



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

KONCEPČNÍ NÁVRH ELEKTROMOBILU

CONCEPTUAL DESIGN OF ELECTROMOBILE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ákos Szabó

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Hejtmánek, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Bc. Ákos Szabó**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Automobilní a dopravní inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Petr Hejtmánek, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Koncepční návrh elektromobilu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vytvoření propracovaného koncepčního návrhu osobního vozidla poháněného čtveřicí elektromotorů umístěným přímo v discích jednotlivých kol. Návrh by měl být vytvořen zejména na základě parametrů dostupných elektromotorů zkonstruovaných přímo pro tento typ elektromobilu.

Cíle diplomové práce:

1. Přehled koncepcí elektromobilů
2. Srovnání elektromobilů s vozidly poháněnými spalovacími motory
3. Přehled základních prvků pohonu elektromobilu
4. Popis elektromotorů určených pro pohon elektromobilu
5. Definování základních požadavků na jízdní vlastnosti elektromobilu
6. Stanovení ostatních požadavků na vozidlo a jeho příslušenství
7. Finální koncepční návrh

Seznam literatury:

JAN, Z., ŽDÁNSKÝ, B., ČUPERA, J.: Automobily (1): Podvozky. Brno: Avid, spol. s r.o., 2009. ISBN 978-80-87143-11-7.

GILLESPIE, T. D.: Fundamentals of Vehicle Dynamics. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1992. ISBN 1-56091-199-9.

JAN, Z., ŽDÁNSKÝ, B., KUBÁT, J.: Automobily (5): Elektrotechnika motorových vozidel I. Brno: Avid, spol. s r.o., 2009. ISBN 978-80-87143-05-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty



ABSTRAKT

Táto diplomová práca sa zaoberá koncepčným návrhom elektromobilu s elektromotormi nachádzajúcimi sa v nábojoch kolies. Na začiatku práce bola namodelovaná dynamika jazdy a dojazd elektromobilu, ktoré boli základom pre výber nevyhnutných komponentov elektromobilu. Následne boli tieto komponenty rozmiestnené podľa vopred definovaných kritérií. Ďalej bol vytvorený kompletný model elektromobilu v programe Creo Parametric. V závere bola vykonaná pevnostná analýza rámu vozidla na statické a dynamické zaťaženie prostredníctvom programu Ansys.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Elektromobil, Európsky Jazdný Cyklus, Superkondenzátor, rám , batérie, MKP

ABSTRACT

This diploma thesis deals with concept design of electric car with electric in-wheel motors. The designing work starts with modeling of dynamic through acceleration and range of electric car. This was necessary to choose important components. These components were placed based on given criteria. The full model of electric car was designed in program Creo Parametric. In the final chapter stress analysis via program Ansys is presented.

KEYWORDS

Electric car, New Europe Driving Cycle, Supercapacitor, batteries, frame, FEM



BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

SZABÓ, Á. *Koncepční návrh elektromobilu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 91 s. Vedúci diplomovej práce Ing. Petr Hejtmánek Ph.D.



ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom a spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Petra Hejtmánka Ph.D. a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brně dne 27. května 2016

.....

Ákos Szabó



POĎAKOVANIE

Týmto by som chcel poďakovať pánovi Ing. Petrovi Hejtmánkovi, Ph.D za čas, ochotu a odborné vedenie pri vypracovaní diplomovej práce.



OBSAH

Úvod	10
1 Svet elektromobilov	11
1.1 Príbeh elektromobilizmu	11
1.1.1 Začiatky	11
1.1.2 Zlaté obdobie	12
1.1.3 Prestávka	13
1.1.4 Nová éra	15
1.2 Výhody a nevýhody elektromobilov	20
1.2.1 Dopad na životného prostredia	20
1.2.2 Motor	20
1.2.3 Účinnosť	20
1.2.4 Zdroj energie	21
1.2.5 Finančné fakty	22
2 Technický prehľad častí elektromobilu	23
2.1 Elektromotory	23
2.1.1 Jednosmerný elektromotor	23
2.1.2 Striedavý elektromotor	24
2.1.3 Umiestnenie elektromotoru	25
2.2 Akumulátory	27
3 Základné parametre elektromobilu	29
4 Dynamické vlastnosti elektromobilu	33
4.1 Jazdné odpory	33
4.1.1 Aerodynamický odpor	34
4.1.2 Odpor stúpania	35
4.1.3 Odpor zrýchlenia	35
4.1.4 Odpor valenia	36
4.1.5 Rovnováha síl na vozidle	36
4.2 Akcelerácia vozidla	38
4.3 Spotreba elektromobilu	41
5 Voľba hlavných častí elektromobilu	43
5.1 Elektromotor	44
5.2 Zdroj energie	47
5.2.1 Trakčné batérie	47
5.2.2 Superkondenzátor	48



5.2.3	Autobatéria	50
5.3	Konvertor	51
5.4	Nabíjačka	51
5.5	BMS	52
6	Usporiadanie elektromobilu	53
6.1	Návrhy na polohu komponentov	53
6.2	Voľba základných rozmerov	55
6.3	Modul batérii	56
6.4	Modul Superkondenzátorov	58
7	Návrh rámu	59
7.1	Voľba materiálu	60
7.2	Model rámu	61
7.3	Pevnostná analýza rámu v programu Ansys	64
7.4	Postup práce	64
7.5	Torzná tuhosť rámu	65
7.6	Zaťaženie ohybom	68
8	Finálny koncept elektromobilu	71
8.1	Hmotnosť navrhovaných častí	71
8.2	Výsledný návrh elektromobilu	72
	Záver	74
	Seznam použitých zkratok a symbolů	78
	Seznam příloh	81



ÚVOD

Svet sa neustále mení. V posledných desiatich rokoch sa automobilový výrobcovia, pod tlakom verejnosti, čoraz viac prikláňajú k alternatívnym zdrojom energie akým je napríklad aj elektrický pohon. Popularita elektromobilov sa postupne zvyšuje a to nielen vďaka snahe zníženia škodlivých emisií unikajúcich do ovzdušia, ale hlavne kvôli zníženiu závislosti na fosílnych zdrojoch energie. Každoročne pribúdajú nové a nové modely, a vznikajú nové spoločnosti, zaoberajúce sa vývojom a výrobou elektromobilov. Jednoznačne sa jedná o zaujímavé technológie, ktoré však zatiaľ trpia mnohými nedostatkami akými sú napríklad neprimerane krátky jazdný dosah, vysoká kúpna cena a nedostatočný počet dobíjaciach staníc výrazne spomaľujúcich ich rozšírenie. Najmä z týchto dôvodov je počet elektromobilov na Slovensku a aj v Českej republike minimálny. Na druhej strane majú množstvo výhod o ktorých nie všetci bežní ľudia vedia. Medzi ich jednoznačné výhody patria nízke prevádzkové náklady, tichosť chodu, dobrý priebeh točivého momentu a ďalšie. Jedná sa o niekoľko stoviek kusov, takže stretnúť elektromobil na našom území je v súčasnosti pomerne zriedkavý jav.

Hlavne vďaka spomínaným dôvodom zatiaľ ústup áut so spaľovacím motorom nie je pravdepodobný. V dnešnej situácii ponúkajú stále viac výhod pre ich kúpu a používanie na našom území ako elektromobily.

Hlavným cieľom diplomovej práce je vytvoriť, na základe súčasných technológií, prepracovaný návrh elektromobilu, ktorý je unikátny tým, že ho poháňajú štyri elektromotory zabudované priamo do nábojov kolies. Snahou je vytvorenie použiteľného a konkurencie schopného elektromobilu z hľadiska jazdnej dynamiky a dojazdu.



1 SVET ELEKTROMOBILOV

Je zrejmé, že elektromobily v dnešnej dobe si predstavujú drahú, luxusnú záležitosť, ktoré sú dostupné pre tých najlepšie situovaných zákazníkov.

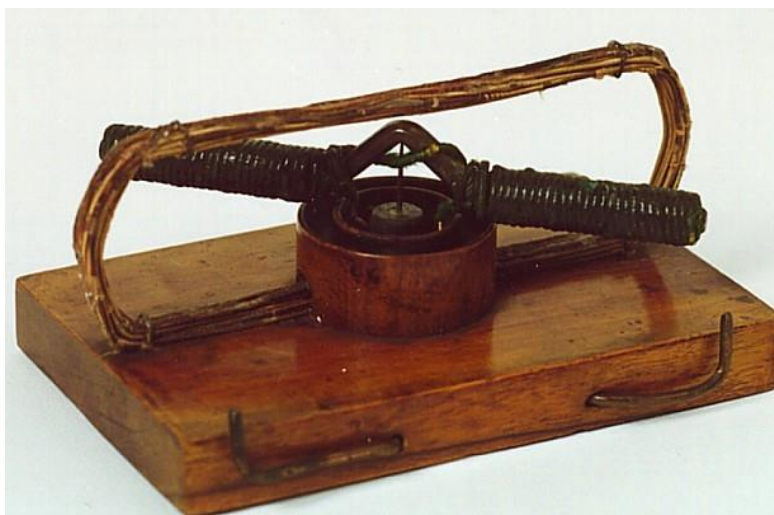
Menej známy fakt je, že elektromobily slúžia ľuďom od dávnejších čias, než ich konkurenti poháňané spaľovacími motormi, preto je potrebné ukázať ich príbeh a dôvod existencie na trhu a vo svete automobilov.

1.1 PRÍBEH ELEKTROMOBILIZMU

1.1.1 ZAČIATKY

V roku 1821 anglický fyzik a chemik Michael Faraday zistil, že elektrický prúd prechádzajúci vodičom vyvolá magnetickú silu. Po tomto objave bolo len otázkou času, kto a kedy zostrojí prvý elektromotor.

Prvenstvo pravdepodobne patrí maďarskému technikovi Ányosovi Jedlikovi, ktorý ako prvý zostrojil elektrický motor s elektromagnetickou cievkou v roku 1828 a následne vytvoril aj svoj elektromobil (jazdil po koľajniciach), ktorý bol dokončený až v roku 1842. Preto jeho produkt nepovažujeme za úplne prvý elektromobil.



Obrázok 1-1 Prvý elektromotor (1828) [5]

Síce skutočné prvenstvo sa stanoviť jednoznačne nedá, medzi prvé elektromobily patria diela troch technikov: Thomasa Davenporta (1834), Roberta Andersona Aderbeena (1832-1839, presný dátum nie je známy) a profesora Sibrandusa Stratingha Groningena (1835).

U týchto konceptov zdrojov energií boli nenabíjateľné, galvanické články (primárne elektrochemické články), ktoré majú v sebe zinok, ktorý v tej dobe bol niekoľko krát drahší než uhlie, palivo parného stroja. Najmä z týchto dôvodov tieto elektromobily nemali praktický význam.



Obrázok 1-2 Stratinghov trojkolesový model elektromobilu [8]

Významný skok v používaní elektromobilov spôsobil vývin nabíjateľnej batérie. V roku 1859 Francúzsky fyzik Gaston Planté vytvoril olovený akumulátor (sekundárne elektrochemické články) a následne dielo zdokonalil jeho nástupca Camille Faure (1881). Tento krok pripravil živú pôdu pre elektromobilismus. [6] [10]

1.1.2 ZLATÉ OBDOBIE

Bezpochyby významná udalosť sa stala v roku 1899 keď belgičan Camille Jenatzy s elektromobilom „La Jamais Contente“, ako prvým vozidlom, prekonal rýchlostnú hranicu 100 km/h, dokonca po troch rokoch elektromobil „Torpedo KID“ prekonal rýchlostnú hranicu až 170 km/h. Je pravda, že napriek týmto rekordom, pri sériovej výrobe elektromobilov kvôli finančnej dostupnosti bolo potrebné vytvoriť kompromis medzi dojazdom a rýchlosťou. Výsledkom kompromisu v tej dobe boli elektromobily s dojazdom 30-80 km (napríklad elektrický taxík Bersey Cab mal dojazd až 80 km) a maximálnou rýchlosťou okolo 20-30 km/h.

Prekonané rýchlostné rekordy, sériová výroba a ďalší vývoj akumulátorov napomohli k rýchlemu rozšíreniu elektromobilov až natoľko, že už na prelome 19. a 20. storočia po cestách jazdilo viac 30000 áut s elektrickým pohonom, boli predbehnuté len paromobilmi.

Postupne sa stali populárnym, hlavne medzi dobre situovanými zákazníkmi, ktorí elektromobily používali hlavne v mestskej doprave, kde ich spomínaný krátky dosah a nižšia maximálna rýchlosť sa neprejavovali.



Obrázok 1-3 Camilleov elekromobil, ktorý už v roku 1899 dosiahol rýchlosť až 105.882 km/h. Mal zaujímavý tvar, podobal sa na raketu.[7]

Elektromobily oproti svojim súperom mali radu výhod. Boli jednoduchší na údržbu, neboli hluční, neprodukovali vibráciu, zápach a kvôli charakteristike elektromotoru nevyžadovali prevodovku. Riadenie týchto vozidiel bolo ľahšie, preto získali popularitu u žien. [12][16]

1.1.3 PRESTÁVKA

Elektromobily na začiatku 20. storočia spolu s paromobilmi jednoznačne prevažovali s vnútorným spaľovaním pred automobily; do roku 1920 výrobcovia predali z nich niekoľko stotisíc kusov, čo v tej dobe znamenalo výraznú dominanciu na trhu.

Do kariet elektromobilov zahrli mnohé udalosti, ako zníženie ceny ropy, avšak treba zvýrazniť dve významné udalosti; vývoj elektrického štartéru (Charles Kettering, 1912), čo umožnilo jednoduché naštartovanie vozidla a sériovú výrobu modelu T (Henry Ford, 1908). Fordov produkt vážil len 540 kilogramov, mal dlhší dosah, ale čo je najdôležitejšie, mal nižšiu cenu oproti elektromobilom. Predajná cena Modelu T činila 500-1000 dolárov, kým elektromobily s podobnými parametrami sa predávali za 1500 až 2000 dolárov. Samozrejme tieto udalosti respektíve fakty viedli k poklesu a následne k dočasnému zániku predaja elektromobilov a úplnému zániku paromobilov. [16]



Obrázok 1-4 Elektromobil od firmy Baker z roku 1912. Na streche sa nachádzajú solárne panely.[10]

V ďalších rokoch vývoj elektromobilov respektíve batérií bol pozastavený, do stredu pozornosti sa dostali spaľovacie motory. Záujem o elektromobily bol čiastočne oživený počas druhej svetovej vojny, Sinajskej vojny, v 70. a 80. rokoch, počas obdobia obmedzeného prístupu k ropu.



Obrázok 1-5 Milburn Electric model 27L z roku 1922, ktorý mal dojazd až 160 km a cenu okolo 1000 dolárov [13]

V takomto období vznikol prestavbou štvorvalcového vozidla Renault Dauphine, elektromobil Henney Kilowatt, ktorý dostal 12 šesťvoltový akumulátor od firmy Exide (dojazd len cca. 80 km) a 5,3 kilowattový pohon s tranzistorovou reguláciou, ktorý umožnil elektromobilu maximálnu rýchlosť až 96 km/h, avšak kvôli cene a kratšiemu dosahu ich sériová výroba bola rýchlo ukončená.



Po vynálezu Niklovo-kadmiových akumulátorov (ktoré boli rýchlo nabíjateľné a vážili menej než obyčajné olovené akumulátory) a Floridovo-iontových batérií, za spolupráce firiem AMC (American Motors Corporation) a Gulton vznikli elektromobily Amitron (1969, maximálny dojazd 250 km pri 80 km/h) a Electron (1977), avšak tieto automobily sa k sériovej výrobe nikdy nedostali. [12]



Obrázok 1-6 Henney Kilowatt od firmy National Union Electric z roku 1960 [14]

1.1.4 NOVÁ ÉRA

Na začiatku deväťdesiatych rokov opäť téma elektromobilov sa stala aktuálnou a to teraz jednak kvôli ropnej kríze v sedemdesiatich a osemdesiatich rokoch, a jednak kvôli zákonu Kalifornského úradu - pre čisté ovzdušie (CARB, 1990), ktorý stanovil, že každý výrobca musí mať aspoň jeden model auta s nulovou emisiou. Pod týmto tlakom spoločnosti znova sa začali zaoberať vývojom elektromobilov, a vytvorili modely ako Chrysler TEVan, S10 EV, Toyota RAV4 EV, Ford TH!NK (2001). V tomto období vznikol aj známy GM EV1, ktorý na rozdiel od ostatných, pôvodne bol konštruovaný ako elektromobil, ostatné vznikli prestavbou pôvodných áut so spaľovacím motorom.

Príchod elektromobilu EV1 priniesol veľa technických novinek, napríklad bezkontaktné indukčné dobíjanie. Stodva kilowattový agregát umožnil dosiahnuť rýchlosť až 130 km/h, a Niklovo - metalhydridové (NiMH) batérie zabezpečili dojazd až 250 km na jedno jediné nabitie (7 hodín pri nabíjaní z 110 V a 2 hodiny z 220V). Na základe týchto vlastností sa dá konštatovať, že GM EV1 predbehol svoju dobu. Napriek zvýšenému záujmu nakoniec firmu zatvorili z neznámych dôvodov. Predané vozidlá na základe kúpnej zmluvy pozbierali (v zmluve to bolo stanovené) a následne zošrotovali. Patent batérie kúpila ropná spoločnosť Chevron, ktorá potom zastavila výrobu i vývoj týchto batérií.



Obrázok 1-7 Model EV1 od firmy General Motors (1996-2003) [14]

Automobilky Honda a Toyota tiež pozastavili vývoj elektromobilov z neznámych dôvodov, a takisto ako GM, niektoré modely pozbierali a zošrotovali. Nakoniec boj medzi Kalifornským úradom a automobilkou sa skončil zrušením predpisov podporujúcich elektromobily (2004). Po incidentu automobilky opäť sa zaoberali len s tradičným spaľovacím respektíve hybridným pohonom. Na trh sa dostali japonské hybridy ako napríklad svetoznámy Toyota Prius.

Prestávka dlho netrvala. Cena ropy stúpala, tým pádom stúpala aj záujem o alternatívny pohon. V roku 2003 dvaja podnikatelia si uvedomili dôvod existencie elektromobilov na trhu a založili automobilku Tesla Motors. Po spolupráci s firmou Group Lotus vytvorili prvý elektrický športový automobil pod názvom Tesla Roadster. Na tomto projekte spolupracovali aj niektorí bývalí odborníci z GM, ktorí pracovali na vývoji modelu EV1. [9]



Obrázok 1-8 Tesla Roadster (2008-2012)[17]

Elektrický roadster má v sebe 185 kilowattový motor, ktorý mu umožňuje rozbehnúť sa z 0 na 100 km/h za 3,7 sekúnd a dosiahnuť maximálnu rýchlosť až 201 km/h. Zdrojom elektromotoru sú lithium-iontové batérie o kapacite 53 kWh, ktoré umožňujú dojazd 320 km. Batérie, ktoré vážili 450 kg, potrebovali 3,5 hodín k úplnému nabitíu a mali životnosť až 160 000 Km. Jednalo sa o malosériovú výrobu, počas štyroch rokov vyrábali a predali 2400 kusov.



V roku 2012 po ukončení výroby Tesly Roadster, automobilka predstavila ďalší model Model S, čo sa predáva aj v súčasnosti. V tomto prípade sa jedná o sedan, ktorý s najsilnejším motorom (508 kW a 930 Nm) je schopný 2,2 tonový sedan (karoséria je z hliníka) vystreliť z 0 na 100km/h za 3,2 sekúnd, čo je výrazný výkon aj medzi benzínovými športovými vozidlami. V súčasnosti zákazníci v rámci svojich finančných možností si môžu vybrať z dvoch motorov a z troch Li-ion batérií s rôznymi kapacitami (Najsilnejšia verzia má kapacitu 90 kWh s dojazdom cca. 560 km). Tesla Model S má základnú cenu cca. 70 tisíc eur (1,9 milión Kč), s rozšírenou výbavou cena môže vyskočiť až na 110 až 120 tisíc eur (v Európe). Napriek vysokej cene Tesla doteraz už predala vyše 100 000 kusov Modelu S.



Obrázok 1-9 Tesla Model S [20]

Po príchode Tesly Roadster postupne automobilky sa začali pripájať k vlne. Prvenstvo patrí aj spoločnosti Mitsubishi, ktorý v roku 2009 predstavil model i-MiEV, prvé elektrické vozidlo pre každodenné použitie. Mestský hatchback-i-MiEV ponúka 49 kW s dojazdom do 150 km (dosah zaručujú Li-ion batérie s veľkosťou 16 kWh), k čomu postačuje 6 hodinové nabíjanie z akejkoľvek bežnej zásuvky (240 V), okrem toho existuje i možnosť rýchlonabíjania v sieti 380V, vtedy doba nabíjania sa skráti približne na hodinu. Mitsubishi i-MiEV doteraz získal veľa ocenení. V roku 2011 s 10 000 kusov predanými vozidlami sa stal najpredávanejším elektromobilom na svete, samozrejme vrátane sesterských modelov Citroen C-zero a Peugeot iOn, ktorý sú v podstate totožný s i-MiEV.



Obrázok 1-10 Citroën C-Zero a Peugeot iOn [21]

V roku 2010 automobilka Nissan tiež uviedla na trh svoj elektromobil, Nissan Leaf, ktorý rýchlo si našiel svojich fanúšikov. Od svojho príchodu sa z neho predalo vyše 200 000 kusov, čím sa stal najpredávanejším elektromobilom na svete. Za svoj úspech vďačí predovšetkým svojej cene ktorá sa začína na úrovni 730 tisíc českých korún.



Obrázok 1-11 Nissan Leaf počas nabíjania [18]

Automobil poháňa 80 kW motor, ktorý umožňuje jazdiť maximálnou rýchlosťou až 144 km/h. Nová generácia Nissan Leaf so zvýšenou kapacitou (z 24 kWh na 30 kWh) Li-ion batérií dosahuje dojazd až 250 km, čo je približne o 50 km viac, než u predchádzajúceho modelu, pričom hmotnosť vozidla sa zvýšila z 1474 kg len o 21 kg. [15]

Vlani BMW oznámila, že približne do roku 2025 plánuje elektrifikovať celú svoju modelovú radu. Dôkazom snahy je aj úspešný futuristický elektromobil BMW i3 (vyše 10000 predaných kusov), ktorého poháňa 130 kilowattový motor, a 160 kilometrový dojazd mu zabezpečujú Li-ion batérie s kapacitou 22 kWh. Maximálna rýchlosť vozidla je 150 km/h, k zrýchleniu z pokoja na 100 km/h potrebuje len 7,2 sekundy vďaka nízkej hmotnosti vozidla,



ktorá je 1195 kg, z čoho Li-ion batérie vážia 230 kg. Veľkou nevýhodou tohto mini MPV je nákupná cena oproti ostatným elektromobilom. Cena sa pohybuje okolo 900 tisíc korún českých. [12]



Obrázok 1-12 Futuristický BMW i3, jediný čisto elektrický BMW v predaji už od roku 2013 [20]

Výberová paleta elektromobilov sa od roku 2012 výrazne rozšírila. Pripojili sa automobilový výrobcovia ako: Toyota, Smart, Kia a ďalší.

V roku 2015 firma Renault uviedol na trh nový a vylepšený automobil pre mestskú prepravu. Model Zoe má ako štandardnú výbavu batériu s kapacitou 22 kWh a má maximálny dojazd až 240 km.



Obrázok 1-13 Renault Zoe [23]

Vyššie uvedené novodobé elektrické vozidlá predstavujú špičku elektromobilov. Podľa predpokladov v roku 2016 môžeme očakávať príchod ďalších modelov, avšak dnešná nízka cena ropy udržiava zvýšený záujem o autá so spaľovacím motorom, čo samozrejme brzdí predaj elektricky poháňaných vozidiel. [24]



1.2 VÝHODY A NEVÝHODY ELEKTROMOBILOV

Je jasné, že v elektromobiloch je veľký potenciál, sú konkurencieschopný oproti ostatným alternatívnym pohonom. V ďalšej kapitole ukážeme, aké výhody respektíve nevýhody prinášajú elektromobily oproti klasickým autám so spaľovacím motorom.

1.2.1 DOPAD NA ŽIVOTNÉHO PROSTREDIA

Je zrejmé, že elektromobily počas prevádzky neprodukujú emisie. Ak berieme do úvahy aj „špinavšie“ spôsoby výroby energie, aj napriek tomu sa dá konštatovať, že elektromobily sú čistejšie, než klasické automobily.

Okrem výroby energie aj výrobné procesy konštrukčných materiálov (napr.: hliník), akumulátorov majú negatívny vplyv na životné prostredie. V dnešnej dobe najrozšírenejším zdrojom energie sú Li-ion akumulátory. V týchto akumulátoroch sa nachádza grafit, ktorého ťažba nie je celkom ekologická, pretože k ťažbe je potrebná kyselina chlorovodíková, ktorá sa vypúšťa do odpadových vôd.

Marketingový ťah o nulových emisiách rozhodne nie je pravdou. Spaľovacie motory v priemere produkujú 160 g oxidu uhličitého na každý kilometer. Emisná záťaž elektromobilov je závislá od regiónov, v Českej republike je to medzi 50-100 g oxidu uhličitého na jeden kilometer v závislosti na spôsobe výroby energie.

Elektromobily hlavne pri nižších rýchlostiach neprodukujú takmer žiadny hluk a vibrácie, čo síce zvyšuje cestovný komfort, ale pre chodcov a bicyklistov sa stávajú často nepočuteľnými, čo môže byť príčinou dopravnej nehody. Preto niektoré elektrické autá pri nižších rýchlostiach najmä v meste, vydávajú pravidelný hluk, čím upozorňujú ďalších účastníkov cestnej premávky. [33]

1.2.2 MOTOR

Elektromotory oproti spaľovacím motorom už od nulových otáčkach ponúkajú maximálny krútiaci moment, tým pádom nevyžadujú prevodovku, vďaka čomu jazda s elektromobilom je plynulá. Elektrické vozidlá sú poháňané bezkomutátorovými motormi, ktoré sú celkom spoľahlivé, majú dlhú životnosť, a nespotrebojú energiu počas státia vozidla. Značnou výhodou je, že dojazd elektromobilu, respektíve množstvo spotrebovanej energie sa nezmení v závislosti od maximálneho výkonu motora, pri rovnako požadovanom výkone.

1.2.3 ÚČINNOSŤ

Celková účinnosť elektromobilov je hlboko ovplyvnená účinnosťou výroby elektrickej energie a batérie (50–90% v závislosti na typu akumulátoru). Samotý elektomobil má účinnosť okolo 90 až 95%, čo zahŕňa účinnosť elektromotoru a dobíjanie akumulátorov.

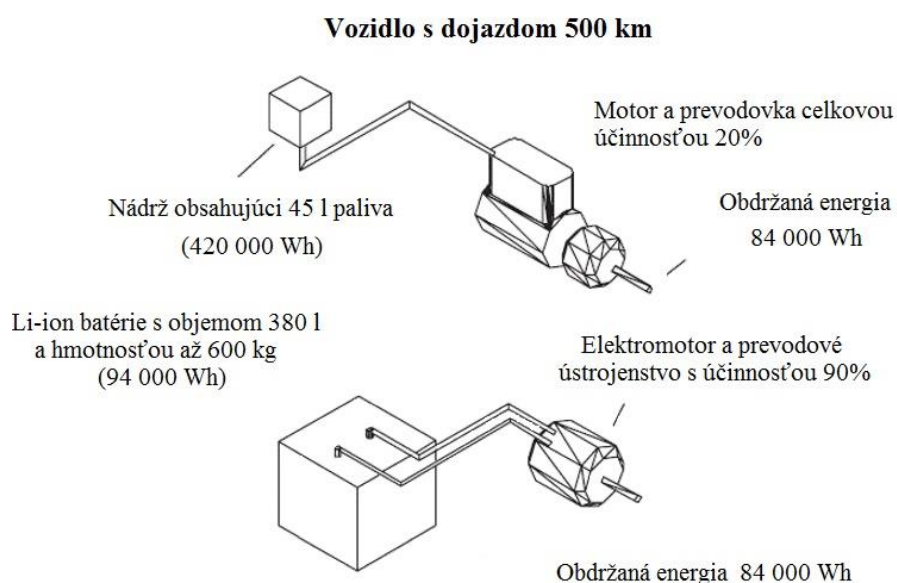
Časť spotrebovanej energie sa dá získať naspäť rekuperáciou, počas čoho sa zachytáva energia vzniknutá počas spomalení a následne sa ukladá do akumulátorov vozidla.



1.2.4 ZDROJ ENERGIE

Výhrevnosť konvenčných fosílnych palív je d'aleko výhodnejšia než hustota energie dnešných batérií. Najlepšie batérie v súčasnosti majú mernú kapacitu maximálne 0,1 kWh/kg (Li-ion akumulátory), čo je len zlomok oproti benzínu, ktorá má hustotu energií až 13 kWh/kg. Preto, aby bol dosiahnutý rozumný akčný rádius, je potrebný dodať k elektromobilu 200 až 300 kilogramový akumulátor, čo výrazne navýši hmotnosť, tým pádom zhoršuje dynamiku vozidla. Na druhej strane rozloženie objemu akumulátorov znamená výzvu pre konštruktérov.

Samozrejme aj u akumulátorov treba hovoriť o životnosti, ktorá v závislosti od typu je rozličná. V súčasnosti najpoužívanéjšie lítium-iontové batérie majú životnosť 500-800 nabíjacích cyklov (alebo 5-10 rokov), čo znamená dojazd 130 až 150 tisíc kilometrov



Obrázok 1-14 Schematické znázornenie rozdielu zdrojov energií (prevzaté a upravené z: [1])

Podľa verejnosti najväčšou nevýhodou elektromobilov je ich krátky dojazd. Podľa štatistiky najazdí denne Európan priemerne 40 až 60 km, čomu je dnes bežný 150-200 km dojazd elektromobilov dostačujúci. [1]



1.2.5 FINANČNÉ FAKTY

Skeptici tvrdia, že za cenu elektromobilu si kúpia nové auto a ešte k tomu 10 000 litrov paliva. Pravdu odhalíme pomocou jednoduchého príkladu.

Elektromobil Volkswagen e-Golf stojí 930 900 Kč. Jeho benzínový kolega s 1.4 pohonom približne s totožnou výbavou stojí 540 000 Kč. Elektrický Golf na každých sto kilometrov spotrebuje 12.7 kWh energie, čo k dnešnému dňu stojí $12.7 \cdot 3,74 = 47$ Kč (Priemerná cena 1 kWh energie je ČR približne 3.74 Kč) po 150 000 kilometrov to znamená 70 700 Kč.

Benzínový Golf má spotrebu 5 litrov na 100 km, čo pri dnešnej cene benzínu je $5 \cdot 27.5 = 137.5$ Kč, a pri 150 000 km je 206 250 Kč. Takže rozdiel je 135 550 Kč. Ak k tomu pripočítame kúpnu cenu tak to vychádza na úroveň 675 550 Kč. Pokiaľ pripočítame náklady na potrebnú údržbu (napr.: výmena oleja, žhavičov, remeňov, atď.) tak sa rozdiel znižuje, samozrejme určitým výdavkom na údržbu ani v prípade elektromobilu sa nevyhneme (napr.: výmena pneumatík)

Finančný rozdiel, ktorý ako aj vyššie uvedený príklad dokazuje, je zatiaľ nezanedbateľný, je hlboko ovplyvnený kúpnu cenou elektromobilu a cenou paliva. Pretože najväčšiu časť kúpnej ceny elektromobilu tvoria akumulátory, lacnejšie batérie sú kľúčové pre rozšírenie elektromobilov.

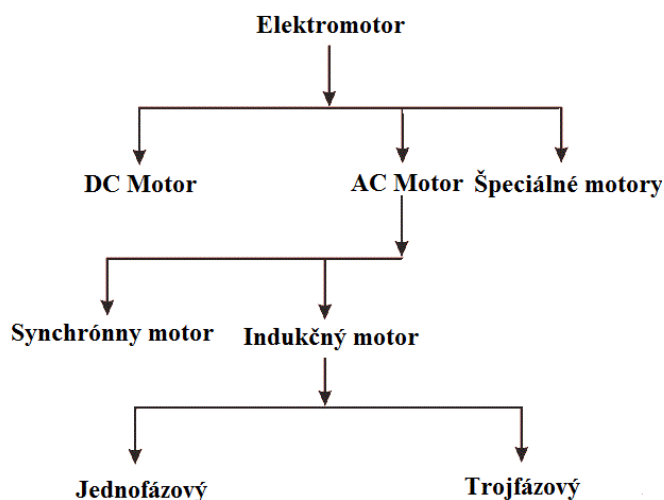


2 TECHNICKÝ PREHĽAD ČASTÍ ELEKTROMOBILU

Elektromobily sa skladajú zo štyroch základných častí, ktorými sú: elektrický motor, regulátor, batérie a systém dobíjania batérií. V tejto kapitole si ukážeme funkcie a vlastnosti elektromotorov a typy akumulátorov.

2.1 ELEKTROMOTORY

Hlavnou úlohou elektromotorov je premeniť elektrickú energiu na mechanickú. Zdrojom energie je elektrina získaná z akumulátorov. V praxi elektromobily využívajú elektromotorov – jednosmerným a striedavým prúdom.



Obrázok 2-1 Rozdelenie elektromotorov

2.1.1 JEDNOSMERNÝ ELEKTROMOTOR

Jednosmerný komutátorový motor

Jedná sa o lacnej variante jednosmerných motorov, avšak kvôli rýchlemu opotrebeniu komutátora a kartárov (v dôsledku trenia a elektrického namáhania), majú krátku životnosť. [32]

Bezkartáčový jednosmerný elektrický motor (BLCD)

BLDC motory už pri malých rozmeroch dosahujú vysoký výkon a majú výbornú dynamiku. Na rotore motoru sa nachádzajú permanentné magnety a na statore sú uložené elektronicky riadené cievky. Vyžadujú jednosmerné napätie, vďaka čomu sú výhodne všade, kde sa používa jednosmerné napájacie napätie. Kvôli vysokej cene permanentných magnetov, cena týchto motorov je pomerne vyššia, avšak napriek tomu BLDC motor je najčastejším pohonom elektromobilov (napr.: BMW i3). [4][32]



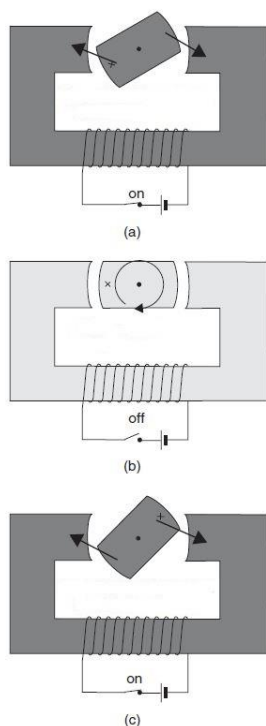
2.1.2 STRIEDAVÝ ELEKTROMOTOR

Elektromotory so striedavým napätím sa hojne používa v širokom pásme priemyselnej výroby. Závisiac od kritérií výkonu, formy alebo finančnej je výber veľmi rozšírený. Aby motor so striedavým prúdom bol funkčný, je nutné premeniť jednosmerný prúd z batérie na striedavý. [32]

Spínaný reluktančný motor

Ďalšou sľubnou technológiu je spínaný reluktančný motor. Striedavý prúd v cievke, ktorá je navinutá na statore, generuje striedavé magnetické pole cez stator na rotor. Rotor sa zo stacionárnej polohy vychýli aby vzduchovú medzeru znížil na minimum medzi stator a rotor. Stále sa meniace generované magnetické pole spôsobuje rotačný pohyb rotoru. Tento typ motoru nepoužíva permanentný magnet, ale indukované magnetické pole, preto sa nazýva reluktančný motor.

Hlavnou výhodou tohto motoru je jednoduchá konštrukcia a z nej vyplývajúca nižšia cena oproti motoru s permanentným magnetom. Vďaka pokroku používania numerických vývojových nástrojov pri návrhu motoru a vďaka ekonomicky prístupnejším mikropočítačom pre riadenie sa v dnešnej dobe rozširuje použitie tohto motoru, aj v automobilovom priemysle. Nevýhodou je veľké kolísanie krútiaceho momentu pri práci na nízkych kmitočtoch. [3]



Obrázok 2-2 Princíp fungovania SRM motoru [3]



2.1.3 UMIESTNENIE ELEKTROMOTORU

V predu uložený elektromotor

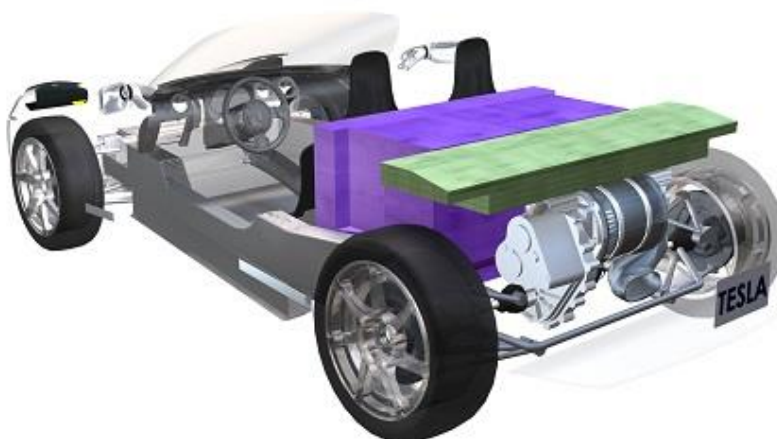
Ide o bežné riešenie, kde sa elektromotor nachádza nad prednou nápravou. Výkon a krútiaci moment elektromotoru je prenášaný na kolesá prostredníctvom diferenciálu a prevodu. Hmotnosť pripadajúca na prednú nápravu je vyššia, čo spôsobuje nedotáčivé chovanie a pozitívne ovplyvňuje brzdné vlastnosti vozidla.



Obrázok 2-3 Volkswagen e-Up! [30]

Vzadu uložený elektromotor

Elektromotor uložený na zadnej náprave je taktiež pomerne bežným riešením, ktoré sa často objavuje aj u klasických automobilov so spaľovacím motorom. V tomto prípade je hmotnosť pripadajúca na zadnú nápravu väčšia, čo spôsobuje pretáčivé chovanie vozidla. Výhoda tohto riešenia sa prejavuje pri zrýchlení vozidla, kde sa hmotnosť prenáša na zadnú nápravu, čím sa zvyšuje prítláčná sila od pneumatiky pôsobiaca na vozovku. Toto riešenie použila firma Tesla v modeli Roadster.



Obrázok 2-4 Tesla roadster [31]



Elektromotor uložený v nábojoch kolies

Zaujímavým riešením je umiestnenie elektromotora v nábojoch kolies. Toto riešenie ponúka vyššiu mechanickú účinnosť a vďaka polohe elektromotorov znižuje výšku hmotného bodu čo zvyšuje stabilitu vozidla. Ďalej vstavané elektromotory umožňujú výhodnejšie rozloženie hmotnosti a vytvorenie lepšieho dizajnu vozidla. Namiesto použitia medzinápravových diferenciálov sa dajú použiť štyri motory, každý v nábojoch kolies. Takým spôsobom sa získa plnohodnotný pohon štyroch kolies. Výraznou nevýhodou je väčšia hmotnosť neodpružených hmôt, čo spôsobuje zhoršenie jazdných vlastností elektromobilu.



Obrázok 2-5 Elektromotor od firmy Schaeffler [32]



2.2 AKUMULÁTORY

Akumulátorové batérie tvoria kľúčovú časť elektromobilov. Skladajú sa z dvoch alebo viacerých elektrochemických článkov, ktoré sú schopné opakovane akumulovať elektrickú energiu vo forme chemickej energie. Okrem kapacity akumulátorov sú dôležité ich hmotnosť, špecifický výkon, hustota energie, rýchlosť dobíjania, počet dobíjacích cyklov, pamäťový efekt, samovybíjanie a v neposlednom rade ich cena.

Tabuľka 2-1 Parametry jednotlivých typov technológií akumulátorov [1]

	Hustota energie		Životnosť [cykly]	Nominálne napätie [V]	Samovybíjanie [%/mesiac]
	[Wh/kg]	[Wh/l]			
NiCd	50	80	2000	1,2	10
NiMH	65	150	1000	1,2	1,3-98
Li-ion	90	150	500-800	3,6	10-12
Li-Pol	160	280	>>1000	3,6	<<1
LiFePO₄	100	220	2000	3,3	<3
Zn-air	470	1500	Nenabíjateľné	1,65	-
Superkondenzátor	14-20	15-30	>1000000	-	100

Nikel-metal hydridový akumulátory

Jedná sa o druh galvanického článku, ktorý dnes je jeden z najčastejšie používaných druhov akumulátorov. Kapacita NiMH akumulátorov je pri rovnakom objeme približne dvojnásobná oproti klasickým NiCd akumulátorov. Nízkú cenu, dlhú životnosť a dokážu dodávať pomerne vysoký prúd a udržať garantované napätie až do úplného vybitia batérie. Značnou nevýhodou týchto batérií je, že pri nižších teplotách sú prakticky nepoužiteľné (zaručená funkcia je do -10C°). [36]

Lithium-iontový (Li-Ion), Lithium-polymerový (Li-pol) akumulátory

Li-ion batéria je v súčasnosti najpoužívanejším akumulátorom v elektromobiloch, vďaka svojej výhodnej elektrickej hustote. Katóda akumulátora je oxid kovu, anóda je z uhlíka a elektrolyt je líthiová soľ v organickom rozpúšťadle. Hlavnou nevýhodou týchto batérií je, že pomerne rýchlo starne – stráca kapacitu (s vyššou teplotou, s vyšším vybíjaným napätím a vyšším stavom napätie sa stárnutie urýchluje). Batérie sú nebezpečné (hrozí výbuch) v prípade nabíjania na vyššiu kapacitu ako je dovolené. Ďalšou nevýhodou je, že vydržia len 500 až 800 nabíjacích cyklov a potom už ich kapacita klesá.

Li-pol akumulátory vychádzajú z li-ion batérií, preto sú ich chemické princípy veľmi podobné, avšak namiesto kvapalného elektrolytu li-pol batérie majú pevný elektrolyt (tuhý polymer). Sú výnimočne ľahké a majú primeranie vysokú energetickú objemovú hustotu a vydržia 3000 - 4000 nabíjacích cyklov. [28]



Lithium-železo-fosfátový akumulátory (LiFePO₄)

Ďalšou verziou Li-ion nabíjacích akumulátorov je lithium-železo-fosfátový (LFP) akumulátor, ktorý používa ako katódového materiálu LiFePO₄. Anoda je vyrobená z uhlíka ako u ostatných lithium-iontových batérií. Síce majú nižšie napätie, nižšiu hustotu energie, avšak na druhej strane sú schopný dodať vyšší prúd, a pri extrémnych podmienkach nevybuchujú. Ďalšími výhodami tejto technológie sú primerane vysoká kapacita, výkon a primerane nízka cena [28]

Superkondenzátory

Superkondenzátory slúžia na krátkodobú akumuláciu energie. Oproti elektrochemickým zdrojom majú nízku energetickú, objemovú aj hmotnostnú hustotu a sú schopné rýchlej akumulácie a následne spotrebovaniu veľkého množstva energie. Bežné elektrochemické batériové články vydržia niekoľko stoviek respektíve tisíc nabíjacích cyklov. Superkondenzátory sú v tomto hľadisku prakticky neobmedzené. Zvládnu totiž aj vyše milión nabíjacích cyklov a to s 95%-nou účinnosťou. Z týchto dôvodov sa využívajú v kombinácii s bežnými akumulátormi, čím s výrazne predĺži ich životnosť. Superkondenzátory fungujú výborne aj pri nižších teplotách vďaka čomu ich zvyknú využívať v arktických krajinách namiesto štartovacej autobaterie. Kvôli nízkemu napätiu jedného článku, je v praxi potrebné superkondenzátory zapojiť sériovo do kondenzátorových batérií. [37]



3 ZÁKLADNÉ PARAMETRE ELEKTROMOBILU

Pred vytvorením konceptu elektromobilu je potrebné špecifikovať hlavné atribúty návrhu, ktoré budú počas práce zohľadnené:

- maximálna pohotovostná hmotnosť vozidla menšia 2500 kg,
- vozidlo určený pre prepravu 7 osôb, primárne určené pre 5 osôb,
- vozidlo určené pre kombinovanú prevádzku,
- dojazd vozidla viac ako 500 km,
- maximálna rýchlosť vozidla 140 km/h,
- maximálna dĺžka vozidla menej ako 4500 mm,
- dobrý pomer kvalita a cena.

Navrhnuté parametre vozidla

Hmotnosť vozidla

Hmotnosť vozidla má veľký vplyv na jeho dynamiku, jazdné vlastnosti a podstatne ovplyvňuje aj spotrebu vozidla. Je potrebné aby bola čo najmenšia, preto pre našu aplikáciu, na základe podobných existujúcich automobilov, bola stanovená horná hranica pohotovostnej hmotnosti na úrovni 2500 kg.

$$m_v = 2500 \text{ kg} \quad (1)$$

Akčný rádius vozidla

Akčný rádius predstavuje dojazd vozidla na jedno nabitie batérie. V dnešnej dobe je akčný rádius spolu s cenou akumulátorov a vyplývajúcou vysokou celkovou cenou vozidla hlavným problémom rozšírenia elektromobilov. Okrem toho je dôležité hovoriť nielen o dojazde elektromobilov, ale aj o infraštruktúre verejne dostupných dobíjacích staníc, ktorá je vo väčšine oblastiach nedostačujúca. Priemerný Európan, ako už bolo spomínané, denne najazdí okolo 80 km, čo by na dojazd elektromobilu bolo dostačujúce, avšak veľký dojazd pôsobí upokojujúco na psychiku vodiča, a v neposlednom rade zvyšuje motiváciu pri kúpe elektromobilu.

Hlavne z týchto dôvodov je snaha vytvoriť koncept s dojazdom cez 500 km, čo je ešte stále približne polovica oproti autám so spaľovacím motorom, ale jedná sa už o elektromobil použiteľný aj na dlhšie trasy.

$$s_v = 500 \text{ km} \quad (2)$$



Maximálna rýchlosť vozidla

Koncepčný návrh sa zaoberá vytvorením elektromobilu určeného primárne pre kombinovanú prevádzku, čo znamená, že vozidlo bude prevádzkované pri rôznych rýchlostiach dosahujúcich maximálnu rýchlosť 130 km/h, čo predstavuje hornú hranicu rýchlosti na diaľnici vo väčšine krajín sveta. Vyplývajú z týchto faktov zahrňujúc prípady jazdy nad povolenú rýchlosť je maximálna rýchlosť vozidla stanovená na úroveň 140 km/h.

$$v_{max} = 140 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \approx 38,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3)$$

Súčiniteľ odporu vzduchu a čelná plocha vozidla

Aerodynamika vozidla hrá tiež veľmi dôležitú úlohu vo výpočtoch. Jej vplyv je značný hlavne pri vyšších rýchlostiach. K výpočtu vzdušného odporu potrebujeme veľkosť čelnej plochy a súčiniteľ odporu vozidla. Tieto charakteristiky, respektíve hodnoty, sú určené buď experimentálne v aerodynamickom tuneli alebo pomocou simulačného programu. Vyplývajú z tvaru karosérie, ktorou sa táto diplomová práca nezaobrá. Veľkosť súčiniteľa odporu a čelnej plochy sú volené na základe podobných existujúcich automobilov.

Koeficient odporu sa u modernejších osobných automobilov pohybuje v rozmedzí 0,4 až 0,2. Väčšími hodnotami disponujú hlavne rozmerovo väčšie vozidlá (napr. SUV alebo Cross-over) a športové autá kvôli prvkom vytvárajúcim väčšiu prítlačnú silu. Naopak nižšie hodnoty majú menšie vozidlá a elektromobily. Väčšina bežných osobných automobilov má odporový koeficient okolo hodnoty 0,3, preto aplikujeme túto hodnotu aj na náš elektromobil.

Koeficient odporu:

$$c_x = 0,3 \quad (4)$$

Čím je menšia čelná plocha tým je aj menší aerodynamický odpor vozidla. V prípade osobných automobilov sa veľkosť plochy pohybuje okolo 2 m³ až 3 m³. Pre koncept elektromobilu volíme hodnotu 2,5 m³.

Čelná plocha elektromobilu:

$$S_x = 2,5 \text{ m}^2 \quad (5)$$



Dynamický polomer kola

Pre koncept elektromobilu navrhujeme pneumatiky označené rozmerom 245/45 R19. Rozmer kolies a pneumatík bol výrazne ovplyvnený veľkosťou elektrických motorov, ktoré sa nachádzajú priamo v nábojoch kolies a povoľujú použiť minimálny rozmer diskov 19 palcov (kapitola 5-2). Použitie väčších rozmerov kolies by okrem estetického hľadiska mohlo výrazne ovplyvniť aj dynamiku vozidla, preto navrhujeme minimálny možný rozmer 19 palcov, ktorý už aj tak prevyšuje bežné rozmery.

Dynamický polomer je vzdialenosť osy rotácie zaťaženého, pohybujúceho sa kola od roviny vozovky. Táto hodnota sa stanovuje z účinného odvaleného obvodu pneumatiky, ktorý je okrem rýchlosti vozidla závislý na type, značke a tlaku hustenia pneumatiky.

Účinný odvalený obvod zvolenej pneumatiky:

$$O_U = 2144 \text{ [mm]} \quad (6)$$

pri rýchlosti $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, pri čom zaťažená pneumatika je nahustená na predpísanú hodnotu tlaku [27].

Dynamický polomer kola:

$$r_d = \frac{O_U}{2 \cdot \pi} = 341,23 \text{ [mm]} \quad (7)$$

kde:

π [–] - Ludolfovo číslo

Uhol stúpania vozovky

Vo výpočtoch dynamiky pre stanovenie výkonu elektromotorov konceptu uvažujeme stúpanie vozovky 6%. Táto hodnota odpovedá maximálnemu dovolenému stúpaniu diaľnici.

Uhol stúpania vozovky:

$$s_s = 100 \cdot \tan \alpha = 6 \text{ [%]} \quad (8)$$

$$\alpha = \cot^{-1} \frac{6}{100} = 3,43[^\circ] \quad (9)$$



Súčiniteľ valivého trenia

Súčiniteľ valivého odporu závisí na typu pneumatiky a na vlastnostiach vozovky. Typické hodnoty súčiniteľa valivého trenia medzi pneumatikou a danou vozovkou zobrazuje tabuľka 3-1.

Tabuľka 3-1 Súčiniteľ valivého trenia pre rôzne povrchy [2]

Typ povrchu	Súčiniteľ valivého trenia
Asfalt	0,01 - 0,02
Dlažba	0,02 - 0,03
Betón	0,015-0,025
Sneh	0,02-0,03
Makadam	0,03 - 0,04
Poľadovica	0,01 - 0,025

Ďalej vo výpočtoch bude uvažovaná priemerná hodnota vyššie uvedených koeficientov:

$$f_v = 0,018 [-] \quad (10)$$

Gravitačné zrýchlenie

Gravitačné zrýchlenie pri povrchu zeme je:

$$g = 9.81 [m \cdot s^{-2}] \quad (11)$$

Hustota vzduchu

Hustota suchého vzduchu pri teplote 0°C a atmosferickom tlaku (101325 Pa) je:

$$\rho_v = 1.29 [kg \cdot m^{-3}] \quad (12)$$

Hmotnosť jedného pasažiera

Stanovená hmotnosť jedného pasažiera:

$$m_p = 75 [kg] \quad (13)$$



4 DYNAMICKÉ VLASTNOSTI ELEKTROMOBILU

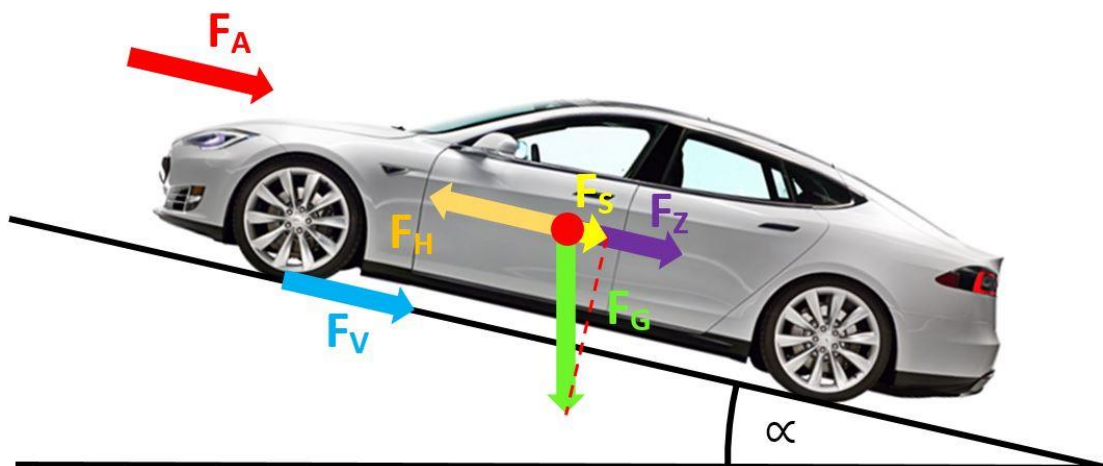
K správne mu výberu a dimenzovaniu nevyhnutných častí elektromobilu pre splnenie určených cieľov návrhu, t.j. dojazd a vyhovujúca jazdná dynamika vozidla, je dôležité zistiť minimálne nároky na tieto komponenty. Na tento účel bol vytvorený výpočtový kód v programe Matlab (príloha P7).

4.1 JAZDNÉ ODPORY

Na určenie zrýchlenia vozidla je potrebné poznať jazdné odpory, ktoré pôsobia proti pohybu vozidla a spotrebovávajú časť energie dodávanej motormi.

Jazdné odpory:

- Aerodynamický odpor - F_A
- Odpor stúpania - F_S
- Odpor zrýchlenia – F_Z
- Valivý odpor - F_V



Obrázok 4-1 Jazdné odpory pohybujúceho sa vozidla (prevzaté a upravené z: [35])



4.1.1 AERODYNAMICKÝ ODPOR

Vzdušný tzv. aerodynamický odpor vzniká v dôsledku obtekania vozidla vzduchom. Pôsobí proti pohybu vozidla a jeho veľkosť rastie s druhou mocninou rýchlosti, čím sa prejavuje najmä pri vyšších rýchlostiach vozidla znižuje hospodárnosť a tým pádom aj dojazd elektromobilu. Vzdušný odpor ďalej zahŕňa aj ventilačné straty spôsobené otáčaním kolies a prúdením vzduchu cez chladiacu sústavu, ktorý v sebe zahŕňa aj rýchlosť a smer vetra voči vozidlu. Vo výpočtoch je vplyv vetru zanedbaný, avšak pri voľbe hlavných komponentov vozidla je potrebné počítať s určitou rezervou práve pre jeho vplyv na dynamiku vozidla.

Veľkosť aerodynamického odporu sa určuje pomocou vzťahu:

$$F_A = \frac{1}{2} \cdot \rho_v \cdot S_x \cdot c_x \cdot v_v^2 \quad [N] \quad (14)$$

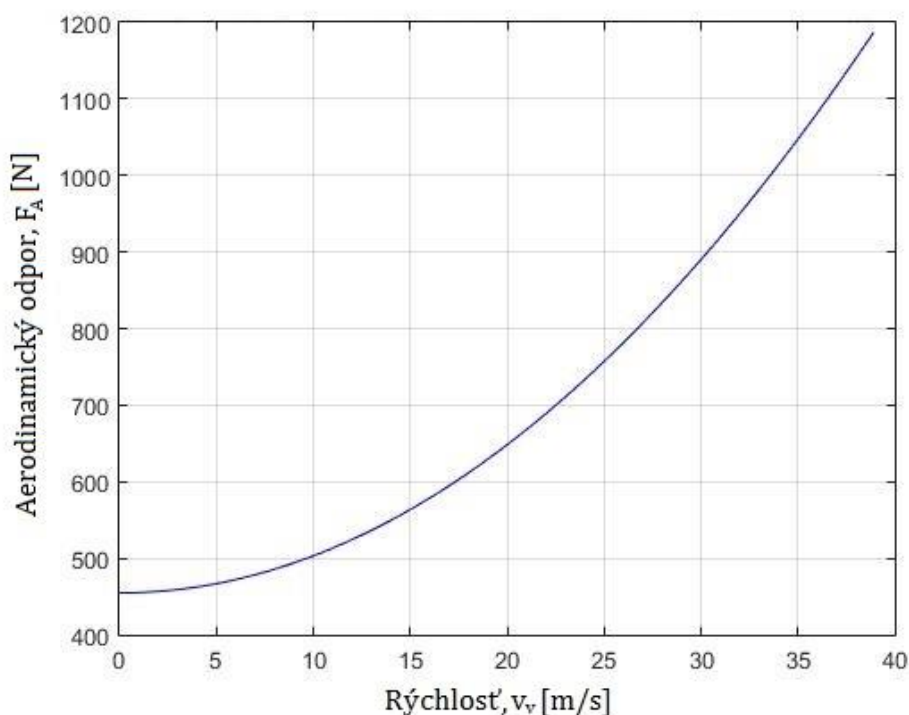
kde:

F_A [N] - aerodynamický odpor,

v_v [$m \cdot s^{-1}$] - rýchlosť prúdenia vzduchu, ktorý sa rovná rýchlosti vozidla.

Potrebný výkon pre prekonaniu vzdušného odporu:

$$P_A = F_A \cdot v_v \quad [N] \quad (15)$$



Obrázok 4-2 Pribeh aerodynamického odporu v závislosti na rýchlosti vozidla



4.1.2 ODPOR STÚPANIA

Odpor stúpania vzniká pri pohybe vozidla do kopca. Jedná sa o zložku tiaže vozidla, rovnobežnou so smerom pohybu automobilu. Veľkosť tejto sily závisí od hmotnosti vozidla a od sklonu vozovky od vodorovnej roviny „ α “.

Platí:

$$F_S = F_G \cdot \sin \alpha = m_v \cdot g \cdot \sin \alpha \quad [N] \quad (16)$$

$$F_S = 1512,9 \quad [N]$$

Výkon potrebný k prekonaniu odporu stúpania pri maximálnej dovolenej rýchlosti vozidla je:

$$P_S = F_S \cdot v_v \quad [kW] \quad (17)$$

4.1.3 ODPOR ZRÝCHLENIA

Odpor zrýchlenia vzniká vplyvom zotrvačnosti hmoty vozidla. Okrem dopredného zrýchlenia vozidla treba počítať aj so zotrvačnosťou pohybujúcich sa komponentov hnacieho traktu, ktoré počas zrýchlenia vozidla taktiež zrýchľujú. V našom prípade, medzi pohybujúce komponenty, patria rotory elektromotorov a k nim pripevnené kolesá (pozri. obrázok 5-2 : elektromotor).

Pre odpor zrýchlenia platí:

$$F_Z = \left[1 + \frac{\sum_i J_{mi} \cdot \eta_e + \sum_i J_{ki}}{m_v \cdot r_d^2} \right] \cdot m_v \cdot a \quad [N] \quad (18)$$

kde:

$a \quad [m \cdot s^{-2}]$ - Zrýchlenie vozidla

$J_m \quad [kg \cdot m^2]$ - Moment zotrvačnosti rotoru elektromotora

$J_k \quad [kg \cdot m^2]$ - Moment zotrvačnosti kolies

Keďže zotrvačnosť rotoru je neznáma, pre našu aplikáciu použijeme zjednodušenú rovnicu v tvare:

$$F_Z = \vartheta \cdot m_v \cdot a \quad [N] \quad (19)$$

kde:

$\vartheta \quad [-]$ - Súčiniteľ vplyvu pohybujúcich častí



Potrebný výkon pre prekonaniu odporu zrýchleniu je:

$$P_Z = F_Z \cdot v_v \text{ [kW]} \quad (20)$$

Veľkosť súčiniteľa vplyvu pohybujúcich sa komponentov hnacieho traktu sa v prípade osobných automobilov pohybuje medzi 1,04 a 1,08. Volíme hodnotu 1,08. [2]

4.1.4 ODPOR VALENIA

Odpor valenia vzniká vplyvom mnohých faktorov. Hlavnými príčinami odporu válenia sú trenie v ložiskách a deformácia vozovky a pneumatiky. Okrem týchto faktorov je odpor závislý na šmýkaní dezénu po vozovke, na trení v pneumatikách a aj rýchlosti vozidla, ktorá taktiež ovplyvňuje veľkosť odporu valenia.

Veľkosť odporu valenia:

$$F_V = G \cdot f_v = 454,69 \text{ [N]} \quad (21)$$

Výkon potrebný k prekonaniu valivého odporu:

$$P_V = F_V \cdot v_v \text{ [kW]} \quad (22)$$

4.1.5 ROVNOVÁHA SÍL NA VOZIDLE

Celkový odpor pôsobiaci proti idúcemu vozidlu je rovný súčtu jednotlivých odporov. Tento odpor musí byť vždy v rovnováhe s hnacími silami, ktoré vyvolajú pohyb vozidla.

Platí:

$$F_H = F_A + F_S + F_V + F_Z \text{ [N]} \quad (23)$$

kde:

$$F_H \text{ [N]} \quad - \text{ Hnacia sila}$$

Po dosadení do rovníc dostaneme:

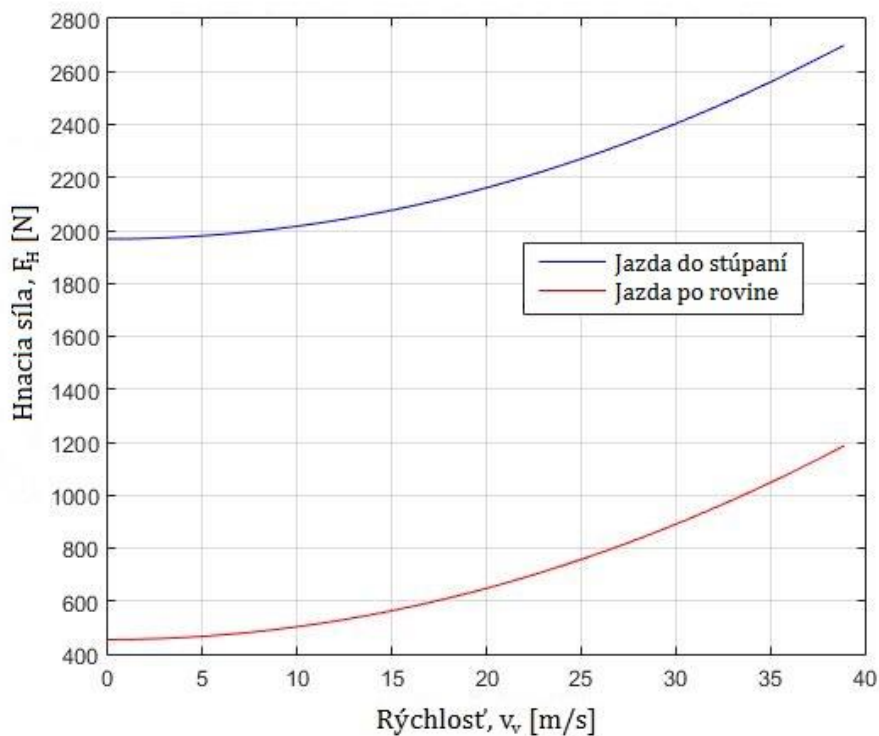
$$F_H = \frac{1}{2} \cdot \rho_v \cdot S_x \cdot c_x \cdot v_v^2 + m_v \cdot g \cdot \sin \alpha + F_G \cdot f + \vartheta \cdot m_v \cdot a \text{ [N]} \quad (24)$$

Treba poznamenať, že veľkosť sily F_S môže byť negatívna v prípade, že vozidlo jazdí po klesajúcom profile vozovky a tak isto aj hodnota sily F_Z môže byť negatívna v prípade, že vozidlo spomaľuje. V týchto prípadoch sa tieto odpory chovajú ako hnacie sily vozidla. Počas jazdy s konštantnou rýchlosťou po rovnej vozovke, hodnoty obidvoch síl nadobúdajú nulové hodnoty.



Celkový odpor pôsobiaci proti pohybu vozidla pri jazde s konštantnou rýchlosťou:

$$F_H = F_A + F_S + F_V \text{ [N]} \quad (25)$$



Obrázok 4-3 Celková odporová sila v závislosti na rýchlosti vozidla

Potrebný výkon pre prekonanie jazdných odporov pri maximálnej rýchlosti vozidla na stúpavej vozovke :

$$P_O = P_A + P_S + P_V = v_{max} \cdot (F_{Amax} + F_S + F_V) = 105,01 \text{ [kW]} \quad (26)$$

Kde aerodynamický odpor pri maximálnej rýchlosti vozidla:

$$F_{Amax} = \frac{1}{2} \cdot \rho_v \cdot S_x \cdot c_x \cdot v_{max}^2 \approx 732,01 \text{ [N]} \quad (27)$$

Potrebný výkon na prekonanie jazdných odporov je pri maximálnej rýchlosti na stúpajúcej vozovke približne 105 kW. Táto hodnota sa teoreticky rovná minimálnemu celkovému výkonu elektromotorov. Avšak je potrebné počítať s dostatočnou rezervou kvôli prípadným ďalším stratám, preto minimálny výkon elektromotoru navýšime o 20 % na hodnotu 126 kW.



4.2 AKCELERÁCIA VOZIDLA

Na základe otáčkovej charakteristiky motora (obrázok 5-2), je výpočet zrýchlenia vozidla potrebný rozdeliť do dvoch fáz. V prvej fáze motor ponúka konštantný točivý moment pričom postupne rastie výkon motora. Po dosiahnutí kritickej uhlovej rýchlosti ω_k , začne točivý moment klesať, pričom výkon motora je maximálny. Platí:

$$F_H = \frac{M}{r_d} = \frac{P}{v_v} \quad [N] \quad (28)$$

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{v_v \cdot r_d} \quad [Nm] \quad (29)$$

Kde:

M [Nm] - Krútiaci moment elektromotorov

P [kW] - Výkon elektromotorov

ω [rad.s⁻¹] - Uhlová rýchlosť elektromotoru

Kritická uhlová rýchlosť je:

$$\omega_k = 2 \cdot \pi \cdot n_k \quad [rad.s^{-1}] \quad (30)$$

kde:

n_k [otmin⁻¹] - otáčky motoru, pri ktorom dôjde k poklesu krútiaceho momentu (Obrázok 5-2).

Pre prvú fázu keď $\omega < \omega_k$ platí:

$$\frac{4 \cdot (M_{max}, M_{trv})}{r_d} = \frac{1}{2} \cdot \rho_v \cdot S_x \cdot c_x \cdot v_v^2 + m_v \cdot g \cdot \sin \alpha + F_G \cdot f + \vartheta \cdot m_v \cdot a \quad [N] \quad (31)$$

kde:

M_{max} [Nm] - Maximálny krútiaci moment elektromotoru(ov)

M_{trv} [Nm] - Trvalý krútiaci moment elektromotoru(ov)

Ak $\omega \geq \omega_k$ platí:

$$\frac{M}{r_d} = \frac{1}{2} \cdot \rho_v \cdot S_x \cdot c_x \cdot v_v^2 + m_v \cdot g \cdot \sin \alpha + F_G \cdot f + \vartheta \cdot m_v \cdot a \quad [N] \quad (32)$$



Po dosadení za M :

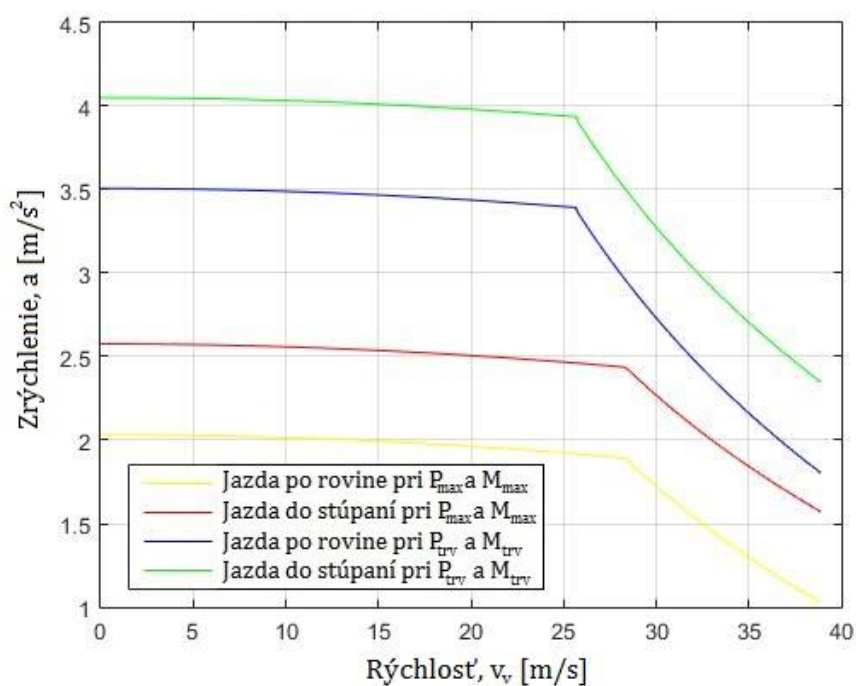
$$\frac{4 \cdot (P_{max}, P_{trv})}{v_v} = \frac{1}{2} \cdot \rho_v \cdot S \cdot c_x \cdot v_v^2 + m_v \cdot g \cdot \sin \alpha + F_G \cdot f + \vartheta \cdot m_v \cdot a \quad [N] \quad (33)$$

kde:

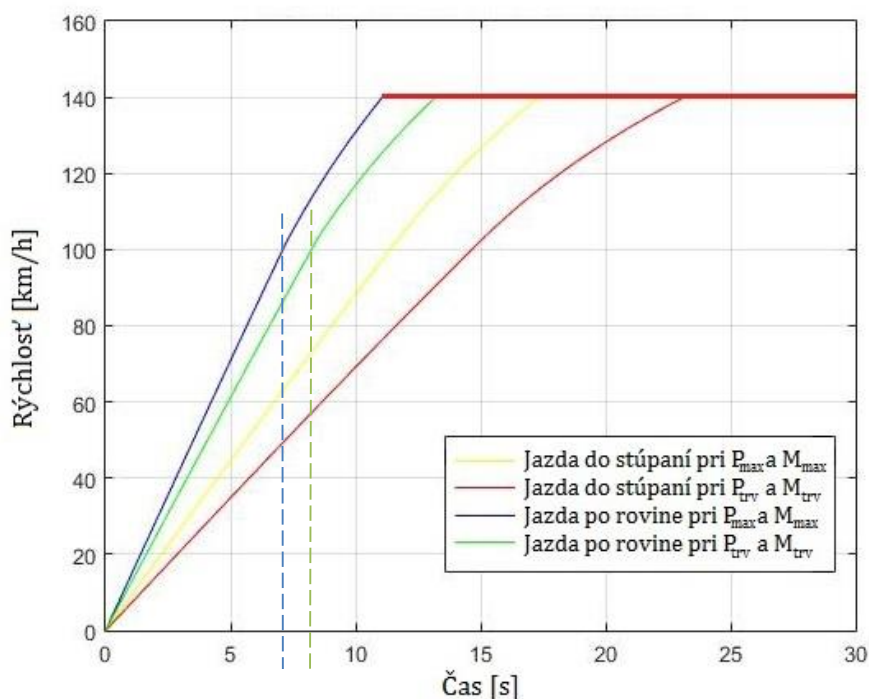
P_{max} [kW] - Maximálny výkon elektromotoru

P_{trv} [kW] - Trvalý výkon elektromotoru

Elektromotory umožňujú na krátku dobu maximálny výkon a krútiaci moment, inak pracujú s trvalými parametrami. Pre porovnanie výpočet sa uskutočňuje pre obe prípady.



Obrázok 4-4 Zrýchlenie v závislosti na rýchlosti vozidla



Obrázok 4-5 Akcelerácia vozidla

Z grafu vyplýva, že vozidlo pri nižších rýchlostiach zrýchľuje vysoké hodnoty zrýchlenia, až do okamihu kedy elektromotory dosiahnu kritickú uhlovú rýchlosť. Po tomto okamihu zrýchlenie prudko klesá. Tento zlom je spôsobený poklesom krútiaceho momentu a je zvyšovaný exponenciálnym rastom odporových síl.

Akcelerácia vozidla je namodelovaná na základe rovníc (31), (33). Z grafu vyplýva, že vozidlo zo zvolenými elektromotormi (kapitola 5.1) na rovine pri:

- maximálneho výkonu a krútiaceho momentu motorov zrýchľuje:
 - z 0 na 100 km/h behom necelých 6,8 s,
 - z 80 na 120 km/h za 2,8 s,
- trvalého výkonu a krútiaceho momentu motorov sa zrýchľuje:
 - z 0 na 100 km/h behom necelých 7,9 s,
 - z 80 na 120 km/h za 4,1 s.

Ďalej pozorujeme, že vozidlo je schopné dosiahnuť maximálnu rýchlosť za necelých 11 s, čo je pri porovnaní s vozidlami rovnakej triedy výborný výsledok. Maximálna rýchlosť je elektricky obmedzená, no na požiadanie zákazníka môže byť zvýšená. Pri návrhu komponentov budeme počítať maximálnym výkonom elektromotorov.

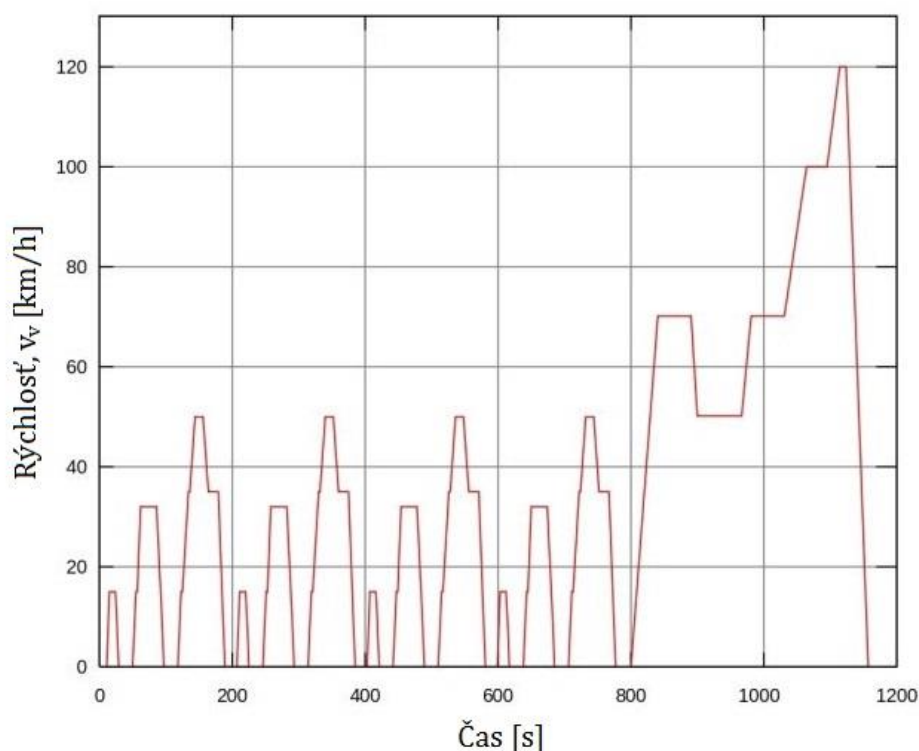
4.3 SPOTREBA ELEKTROMOBILU

Ďalšou veľmi dôležitou charakteristikou elektromobilu je jeho jazdný rádius. Cieľom návrhu je vytvoriť koncept s dojazdom na úrovni približne 500 km. Výpočet množstva energie potrebnej na prekonanie trasy dlhej 500 km je možný pomocou predchádzajúcich rovníc (31), (33) a návrhu priebehu jazdy:

- s konštantnou rýchlosťou,
- pomocou jazdného cyklu.

Európsky jazdný cyklus

Výpočet s konštantnou rýchlosťou je pomerne nepresný, pretože v skutočnosti vozidlo počas jazdy zrýchľuje a spomaľuje. Z týchto dôvodov sa výpočet uskutočňuje na základe jazdného cyklu. Voľbou sa stal Európsky jazdný cyklus (NEDC). Je to najpoužívanejší a jednoducho naprogramovateľný cyklus, avšak má aj svoje určité nevýhody, ako napríklad príliš nízka



Obrázok 4-6 Európsky jazdný cyklus (NEDC)

priemerná rýchlosť vozidla počas jazdného cyklu ($33 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$). Keďže sa však používa u normovaných testov vozidiel, využijeme ho aj pre výpočet dojazdu nami navrhovaného elektromobilu. Európsky jazdný cyklus pozostáva zo štyroch mestských (UDC) a jedného mimomestského cyklu (EUDC). Celý cyklus trvá 1100 sekúnd, počas ktorého vozidlo prejde 11 kilometrov.



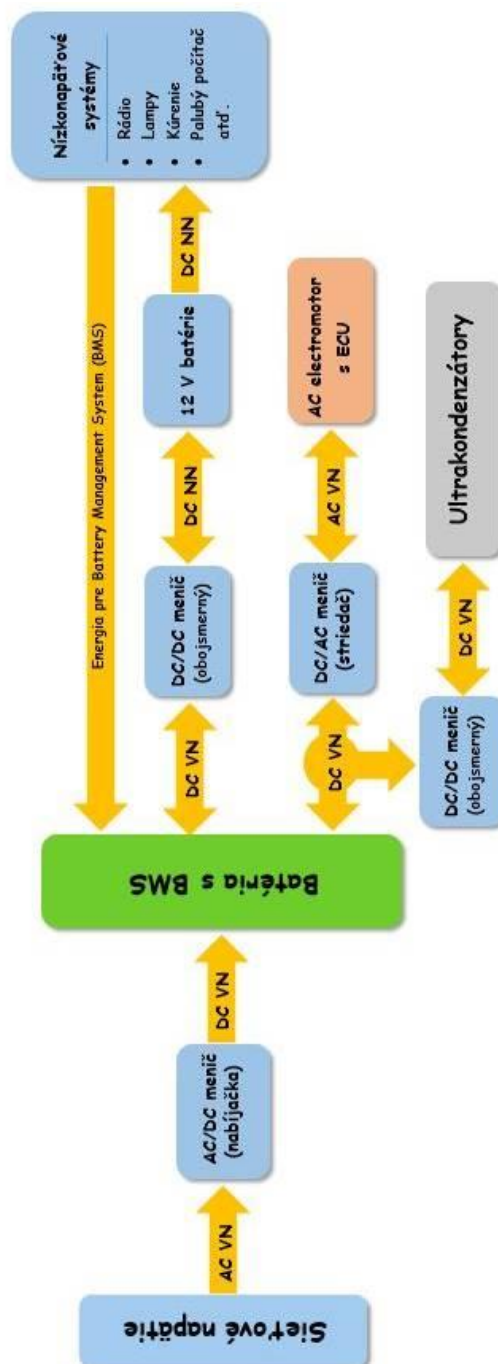
Počas spomaľovania uvažujeme rekuperáciu energie brzdením, kedy dôjde k premene časti kinetickej energie späť na využiteľnú elektrickú energiu. Podľa technickej listiny elektromotor, ako generátor, pracuje s 85% účinnosťou (kapitola 5.2). Treba poznamenať, že k prudkému brzdeniu sú použité štandardné kotúčové brzdy, čím sa značná časť energie uvoľňuje do prostredia vo forme tepla.

Podľa výpočtov spotrebuje vozidlo počas 500 km trasy $102,4 \text{ kW}\cdot\text{h}^{-1}$ energie. Táto hodnota sa už blíži k realite a zahrňuje účinnosť elektromotorov (kapitola 5.2). Avšak stále nie je úplne presná, pretože nezahrňuje účinnosť akumulátorov a spotrebu doplnkových zariadení, ako je klimatizácia, lampy, palubný počítač atď. Navyše je potrebné, aby nedošlo k rýchlemu opotrebeniu batériových článkov a aby nedochádzalo k úplnému vybíjaniu a následnému maximálnemu nabíjaniu. Z týchto dôvodov navýšime kapacitu batérievej sústavy na hodnotu $110 \text{ kW}\cdot\text{h}^{-1}$.



5 VOĽBA HLAVNÝCH ČASTÍ ELEKTROMOBILU

Bežné elektromobily pozostávajú z niekoľkých podstatných častí ktoré sú navzájom prepojené. Systém koncepčného elektromobilu znázorňuje obrázok 5-1.



Obrázok 5-1 Bloková architektúra systému u elektromobilu



U návrhu sa jedná o systém využívajúci hybridný zdroj energie. Výhoda tohto systému spočíva predovšetkým vo vlastnostiach superkondenzátorov. Bežné batérie sú síce schopné udržať veľké množstvo energie aj počas dlhšej doby, avšak ich životnosť je obmedzená na maximálne 1000 nabíjacích cyklov, čo je pomerne nevýhodné pri rekuperácii brzdnéj energie, kedy sa pri každom brzdení akumulovaná energia ukladá do akumulátorov. Ďalej ich životnosť výrazne ovplyvňuje rýchla odozva veľkého množstva energie pri zrýchlení vozidla. Riešením týchto nedostatkov sú superkondenzátory, ktoré k svojmu fungovaniu vyžadujú obojsmerný vysoko-výkonný DC-DC menič. Jednosmerné napätie dodávané zo zdrojov napätia a prúdu premení striedač na striedavé napätie, potrebné pre elektromotory, ktoré sú riadené elektronicky. Nízkonapäťovú časť systému tvorí predovšetkým DC-DC menič, ktorý premieňa vysoké napätie batérievej sústavy na nízke, čím napája autobateriu a ďalšie doplnkové zariadenie elektromobilu (rádio, palubný počítač atď.). Systém ďalej zahrnuje palubnú nabíjačku, ktorá transformuje striedavé napätia na jednosmerné, čím umožňuje nabíjanie elektromobilu aj z klasickej domácej zásuvky.

Jednotlivé 3D modely vybraných prvkov elektromobilu boli získané buď priamo od výrobcu alebo boli vytvorené pomocou programu Creo Parametric 3.0

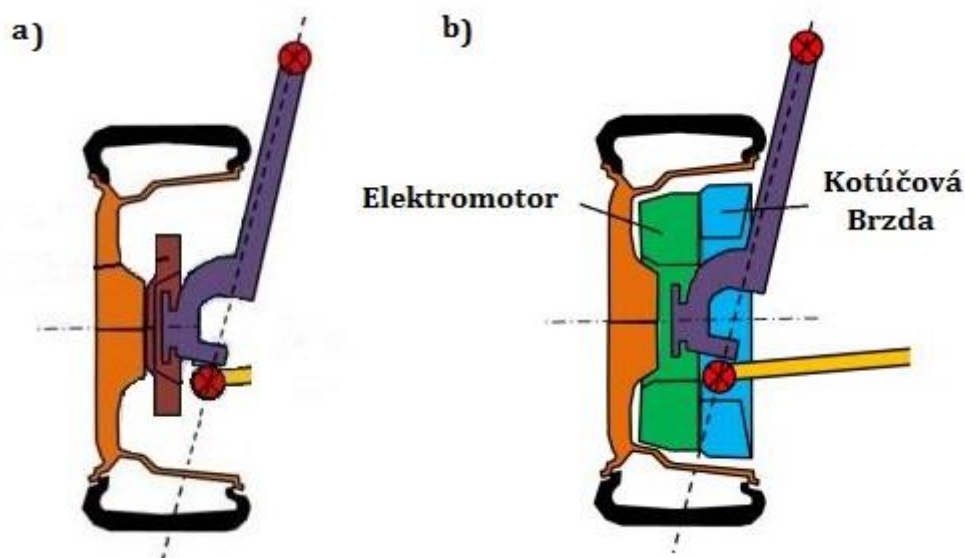
5.1 ELEKTROMOTOR

Elektromotor je kľúčovou časťou elektromobilu. Podľa zadania diplomovej práce je potrebné, aby na pohon elektromobilu slúžili výhradne štyri elektromotory nachádzajúce sa v nábojoch kolies. Táto skutočnosť výrazne znižuje výberovú paletu elektromotorov. Pre výber elektromotoru volíme tri spoločnosti: *Protean Electric*, *Elaphe* a *Schaeffler*.

Pri voľbe je potrebné sa zamerať na trakčné elektromotory:

- s minimálnym celkovým výkonom na úrovni 126 kW, čo predstavuje potrebný výkon na prekonanie jazdných odporov pri jazde maximálnou rýchlosťou,
- s čo najmenšou hmotnosťou, aby bola hmotnosť neodpružených hmôt vozidla čo najmenšia,
- schopné s čo najväčšou účinnosťou regenerovať brzdnú energiu,
- nízkou cenou

Na základe týchto požiadaviek volíme elektromotor od spoločnosti *Protean Electric* s označením *PDI8* (príloha P1). Jedná sa o vodou chladený, striedavý elektromotor s permanentnými magnetmi.



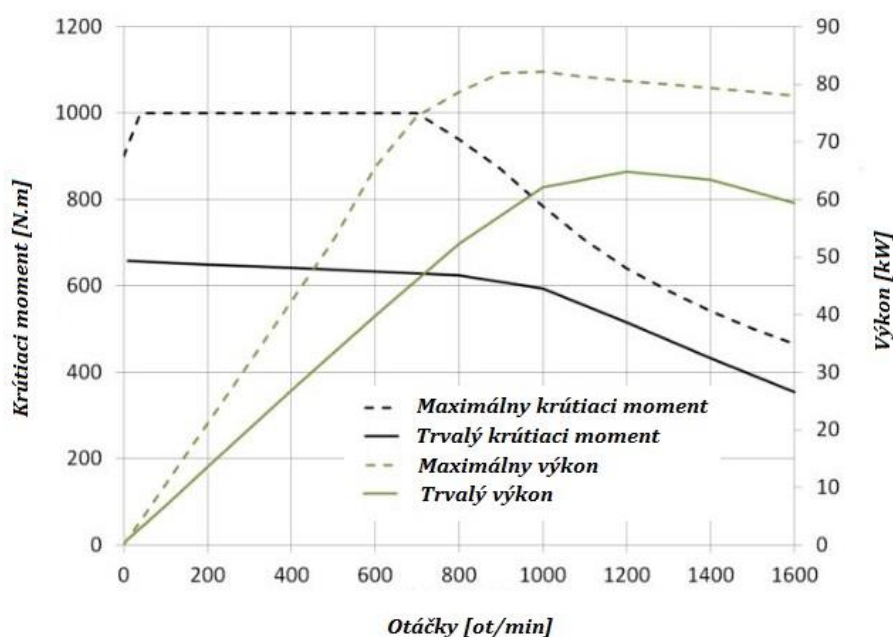
Obrázok 5-2 Uloženie elektromotoru PD18 v kolese - a) bežná konfigurácia, b) koleso s elektromotorom [26]

Charakteristiky elektromotoru PD18 [26]:

- spolupráca s bežnými zaveseniami,
- vyše 90% účinnosť elektromotorov,
- 85% účinnosť regenerácie brzdnéj energie,
- vysoký výkon a krútiaci moment,
- integrovaný prevodník a riadiaca jednotka,
- súčasťou systému je aj priestorovo kompaktná kotúčová brzda,
- nízka spotreba,
- relatívne nízka hmotnosť,
- vodou chladený,
- elektromotor vyžaduje minimálne 18 palcové disky a spolu s kotúčovou brzdou vyžaduje konfigurácia 19 palcové disky.

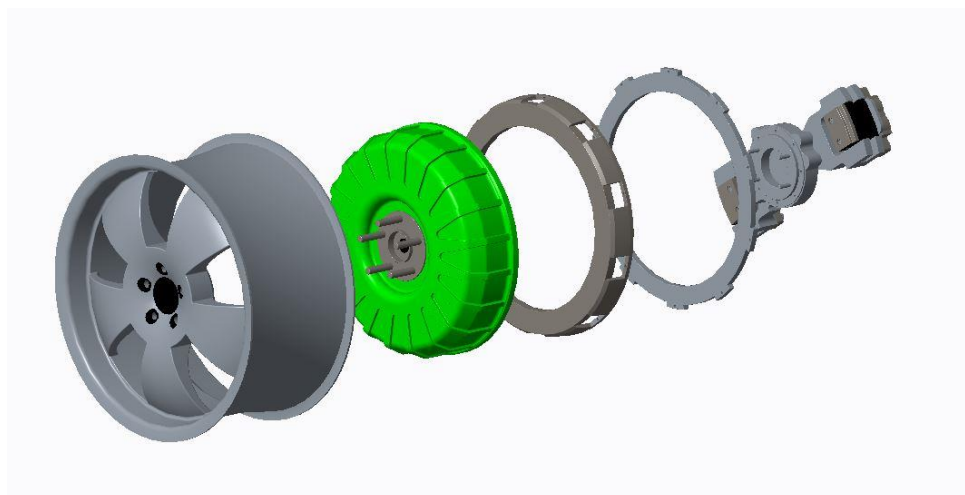
Tabuľka 5-1 Základné Parametre elektromotoru (príloha P1)

Maximálny výkon	$P_{\max} = 75$ [kW]
Trvalý výkon	$P_{\text{trv}} = 54$ [kW]
Maximálny krútiaci moment	$M_{\max} = 1000$ [Nm]
Trvalý krútiaci moment	$M_{\text{trv}} = 650$ [Nm]
Vstupné napätie	200-400 [V(dc)]
Šírka	115 [mm]
Priemer	420 [mm]
Celková hmotnosť	$m_E = 34$ [kg]



Obrázok 5-3 Momentová charakteristika elektromotoru (Príloha P1)

Najväčšia nevýhoda tohto systému je vysoká hmotnosť. Elektromotor síce váži len 34 kg, avšak táto hmotnosť sa nachádza priamo v nábojoch kolies, čím sa výrazne navýši hmotnosť neodpružených hmôt vozidla. To spôsobuje rýchlejšie opotrebenie pneumatík, negatívne ovplyvňuje ovládateľnosť vozidla (priľnavosť k vozovke), kvalitu respektíve komfort jazdy a v neposlednom rade výrazne zvyšuje opotrebovanie zavesenia kolies. Napriek týmto nevýhodám, spoločnosť *Protean Electric* tvrdí, že bežný vodič vplyv hmotnosti elektromotorov na kvalitu jazdy nepozná.



Obrázok 5-4 3D model elektromotoru PROTEAN PD18



5.2 ZDROJ ENERGIE

5.2.1 TRAKČNÉ BATÉRIE

V kapitole č. bol opísaný široký sortiment typov trakčných batérii. Každá technológia má svoju silnú, ale aj slabú stránku. Pri výbere vhodnej technológie boli zohľadnené nasledujúce požiadavky:

- vysoká hmotnostná a objemová energetická hustota,
- vysoká životnosť,
- ekologickosť,
- nízka cena.

Z vymenovaných požiadaviek je najdôležitejšia vysoká hmotnostná a objemová hustota, ktoré majú najväčší vplyv na návrh ďalších dielov elektromobilu.

Vybraným batériovým článkom sa stal NCR18650B od spoločnosti Panasonic na báze LiNiCoAlO_2 . Jedná sa o jeden z najmodernejších batériových článkov na trhu, predovšetkým vďaka vysokej objemovej a hmotnostnej energetickej hustote. Má malé rozmery, vďaka čomu sú moduly, obsahujúce niekoľko stoviek článkov, ľahko prispôsobiteľné.



Obrázok 5-5 Batériový článok Panasonic NCR18650B [38]

Tabuľka 5-2 Technické parametre batériového článku (Príloha P2)

Kapacita	$I_B = 3350 \text{ [mAh]}$
Menovité napätie	$U_B = 3.6 \text{ [V]}$
Hmotnosť	$m_B = 48.5 \text{ [g]}$
Energetická hustota	$E_{HO} = 676 \text{ [Wh.l}^{-1}\text{]}$ $E_{HH} = 243 \text{ [Wh.kg}^{-1}\text{]}$

**Výpočet počtu článkov:**

Celková kapacita bateriovej sústavy:

$$E_C = 110 \text{ [kWh]} \quad (34)$$

Kapacita jedného článku:

$$E_{\check{c}} = I_B \cdot U_B = 12,06 \text{ [Wh]} \quad (35)$$

Počet článkov:

$$Po_B = \frac{E_C}{E_{\check{c}}} = 9121,06 \approx 9122 \text{ kusov} \quad (36)$$

Potrebný minimálny počet článkov je 9122 kusov, ktorý sa pri návrhu uloženia článkov môže zvyšovať.

5.2.2 SUPERKONDENZÁTOR

Ako sekundárny zdroj energie uvažujeme superkondenzátory, ktoré vďaka svojim charakteristikám vyhovujú na tento účel najviac (pozri. kapitola 2.2).

K správnej voľbe typu a počtu článkov je potrebné zistiť maximálne množstvo energie ktorá vznikne počas jazdy brzdením. Na základe NEDC cyklu maximálna získaná energia brzdením je 216 W.h^{-1} , ktorá vznikne počas spomalenia zo 120 km/h na 0 km/h. Je potrebné, aby boli superkondenzátory schopné túto energiu na krátku dobu akumulovať, až do okamihu jej ďalšieho využitia.

Pri výbere superkondenzátora sú zohľadnené nasledujúce faktory:

- vysoká energetická hustota,
- vysoká kapacita,
- vysoké menovité napätie,
- vysoký maximálny prúd,
- nízka cena.

Voľbou sa stal článok superkondenzátora od spoločnosti Maxwell s označením BCAP3400 P285 K04/05 (príloha P3)



Obrázok 5-6 Maxwell BCAP3400 P285 K04/05 (Príloha P3)

Tabuľka 5-3 Technické parametre článku (Príloha P3)

Menovité napätie	$U_K = 2.85 \text{ [V]}$
Kapacita	$C_K = 3400 \text{ [F]}$
Uložená energia	$E_K = 3.95 \text{ [Wh]}$
Max. prípustný prúd	$I_{Kmax} = 2000 \text{ [A]}$
Hmotnosť	$m_K = 520 \text{ [g]}$
Účinnosť	$\eta_K = 95 \%$

Výpočet množstva článkov superkondenzátorov:

Regenerovaná energia:

$$E_R = 216 \text{ [Wh]} \quad (37)$$

Kvôli nízkeho napätia článku uvažujeme sériové zapojenie superkondenzátorov. Platí:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (38)$$

kde:

 $C \text{ [F]}$ - kapacita jedného superkondenzátoru

Pre určenie minimálneho počtu kondenzátorov je potrebné brať do úvahy, že kondenzátor môže byť polovične vybitý (aby nedošlo k poškodeniu článkov) a maximálny prúd prechádzajúci kondenzátorom nemôže presahovať hodnotu 2000 A (pozri.: P1).

Pre minimálne celkové napätie zásobníka platí:

$$4 \cdot P_{max} = U_{KZ} \cdot I_{Kmax} \rightarrow U_{KZ \ 50\%} = \frac{4 \cdot P_{max}}{I_{Kmax}} = 150 \text{ [V]} \quad (39)$$



Pri plne nabitých superkondenzátoroch je napätie:

$$U_{KZ} = 2 \cdot U_{KZ\ 50\%} = 300\ V \quad (40)$$

Počet článkov určí podiel celkového napätia zásobníka a napätia jedného článku:

$$Po_K = \frac{U_{KZ}}{U_K} = 105,26 \approx 106\ kusov \quad (41)$$

Pre uchované množstvo energie kondenzátormi platí:

$$E_Z = \frac{1}{2} \left(C_K \cdot \frac{1}{106} \right) \cdot \left((106 \cdot U_K)^2 - \left(\frac{106 \cdot U_K}{2} \right)^2 \right) \cdot \eta_K = 304,93\ Wh \quad (42)$$

Na základe výsledkov konštatujeme, že pre našu aplikáciu je počet 106 kusov kondenzátorov dostačujúci.

5.2.3 AUTOBATÉRIA

Aj v prípade elektromobilov je potrebná autobatéria. Primárnou úlohou autobatérie v elektromobiloch je napájať bezpečnostné systémy, lampy a slúži aj ako zdroj pre BMS systémy, čo znamená, že bez autobatérie elektromobil nie je schopný štartu.

Kvôli nízkej životnosti bežných olovených batérií, sa voľbou stala autobatéria od spoločnosti *SmartBattery* s označením *SB40* na báze *LiFePO₄* (príloha P6). Jedná sa o drahú autobatériu, avšak jej cena je kompenzovaná až 10 krát dlhšou životnosťou oproti tradičným oloveným autobatériám.



Obrázok 5-7 3D model autobatérie SB40



5.3 KONVERTOR

Konvertor t.j. menič signálu je elektrické zariadenie, ktoré slúži na zmenu veľkosti jednosmerného prúdu alebo napätia. V systéme elektromobilu sa nachádzajú dva jednosmerné meniče. Jeden slúži na zmenu napätia batérievej sústavy na nízke napätie, ktoré napája nízkonapäťové zariadenie ako je lampy, rádio atď. Vzhľadom na veľké množstvo prídavných zariadení je v dnešných automobiloch potrebné vybrať menič s dostatočným príkonom. Voľbou sa stal menič od firmy *Brusa* s označením *BSC623-12V* s výkonom 3.5 kW (príloha P4). Jedná sa o obojsmerný menič, ktorý v núdzovej situácii umožňuje nabíjanie aj cez štartovací kábel.



Obrázok 5-8 3D model meniču BRUSA BSC623-12V

Druhý menič slúži na prepojenie superkondenzátorov batérii a elektromotorov. Musí byť vysokovýkonný, aby umožnil priame napájanie elektromotorov. Vysokovýkonné meniče vyrába na tieto účely firma *Fraunhofer*. Najnovšie vysokovýkonné obojsmerné DC-DC meniče sa vyrábajú s energetickou hustotou až 40 kW/dm^3 . Na základe týchto informácií uvažujeme teleso s objemom 12 dm^3 , s hmotnosťou 10 kg a s rozmermi 260x290x160 (v 3D modele označený žltou farbou). Menič pracuje s vyše 99 % účinnosťou.

5.4 NABÍJAČKA

Palubná nabíjačka v elektromobile umožňuje nabíjanie trakčných batérii priamo z domácej zásuvky. Úlohou nabíjačky v elektromobile konvertovať tento sieťový striedavý prúd na jednosmerný, ktorý následne sprostredkuje k trakčným batériám. Volíme nabíjačku s výkonom 22 kW od spoločnosti *BRUSA* s označením *NLG664* (príloha P5).

Treba poznamenať, že je potrebné umožniť nabíjanie z mimo palubnej nabíjačky na nabíjaciach staniciach. Takéto stanice môžu mať výkon značne vyšší než palubné nabíjačky, čím výrazne znížia dobu nabíjania.



Obrázok 5-9 3D model nabíjačky BRUSA NLG664

5.5 BMS

Prítomnosť BMS (Battery Management System) je dôležitá hlavne pri používaní väčšieho počtu batériových článkov ako je tomu aj v našom prípade. Slúži na monitorovanie stavu jednotlivých batériových článkov. Systém zaisťuje, že nedôjde k prebíjaniu a následnému hlbokému vybíjaniu jednotlivých článkov a v prípade poruchy daný článok vylúči z obvodu. Vďaka tomuto systému sa zvyšuje životnosť a výkon celej batériovej sústavy. BMS systém navrhuje odborník na základe počtu článkov. Pre našu aplikáciu budeme rátať s telesom o objeme 6 l, s rozmermi 250x200x120 a hmotnosťou 10 kg . BMS systém je v 3D modeli označený zelenou farbou.



6 USPORIADANIE ELEKTROMOBILU

Po výbere jednotlivých komponentov elektromobilu je potrebné určiť ich vhodné miesto. Pre rozmiestnenie prvkov je dôležité zohľadniť požiadavky ako:

- dynamická vyváženosť,
- jednoduchá a ľahká prístupnosť komponentov (možnosť výmeny či opravy komponentov s najnižšou životnosťou ako napríklad batérie),
- jednoduchosť,
- pohodlie a bezpečnosť vodiča a pasažierov.

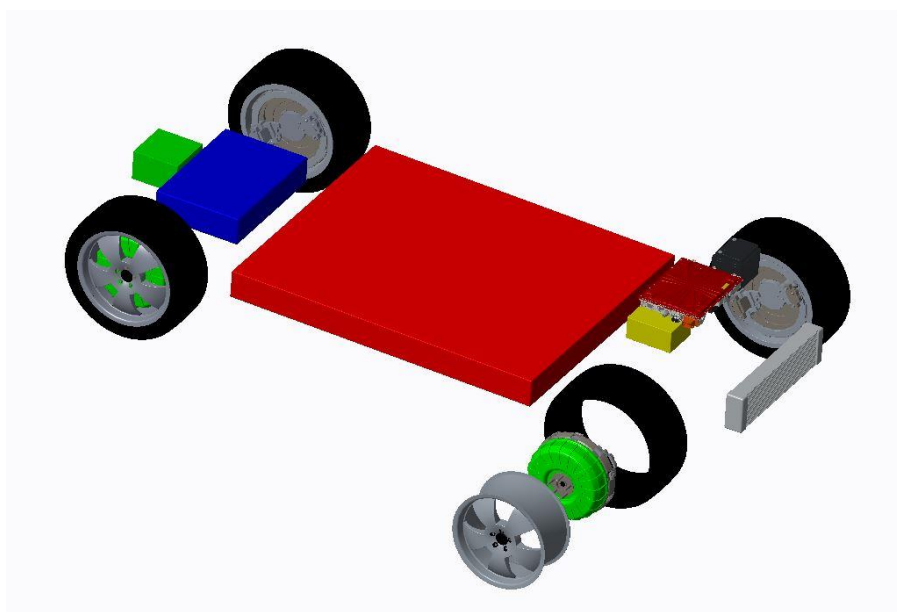
K dosiahnutiu konceptu stabilného vozidla je potrebné, aby bol čo najväčší rozchod a čo najnižšia možná poloha ťažiska. Kvôli tomu sme zvolili polohu batérii a superkapacitorov, teda najťažších častí elektromobilu, čo najnižšie. Umiestnenie elektromotorov v nábojoch kolies, pre ich polohu blízko vozovky, taktiež zlepšuje jazdné vlastnosti vozidla.

Pri tvorbe návrhu bol použitý program Creo Parametric 3.0. Model trakčnej batérie a superkondenzátorov je ilustračný, ich skutočná veľkosť bude navrhovaná v kapitole 6.3 a 6.4.

6.1 NÁVRHY NA POLOHU KOMPONENTOV

Návrh č. 1.

V zmysle vyššie spomínaných podmienok pre stabilitu vozidla bol vytvorený návrh č. 1. Trakčné batérie sú umiestnené pod celou podlahou posádky, čím došlo k zníženiu výšky ťažiska vozidla. Superkondenzátory sa nachádzajú v zadnej časti vozidla, v priestore medzi zadnými kolesami. Toto riešenie umožňuje jednoduchú prístupnosť k týmto komponentom v prípade ich opravy alebo výmeny. Pretože vysokovýkonný DC/DC - menič pracuje s kondenzátormi, je vhodné ich umiestniť blízko seba, teda tiež do zadnej časti vozidla. Ďalšie komponenty sú umiestnené v prednej časti vozidla, aby bola zaťažená aj predná náprava a aby nedošlo k zbytočnému navýšeniu dĺžky káblov.



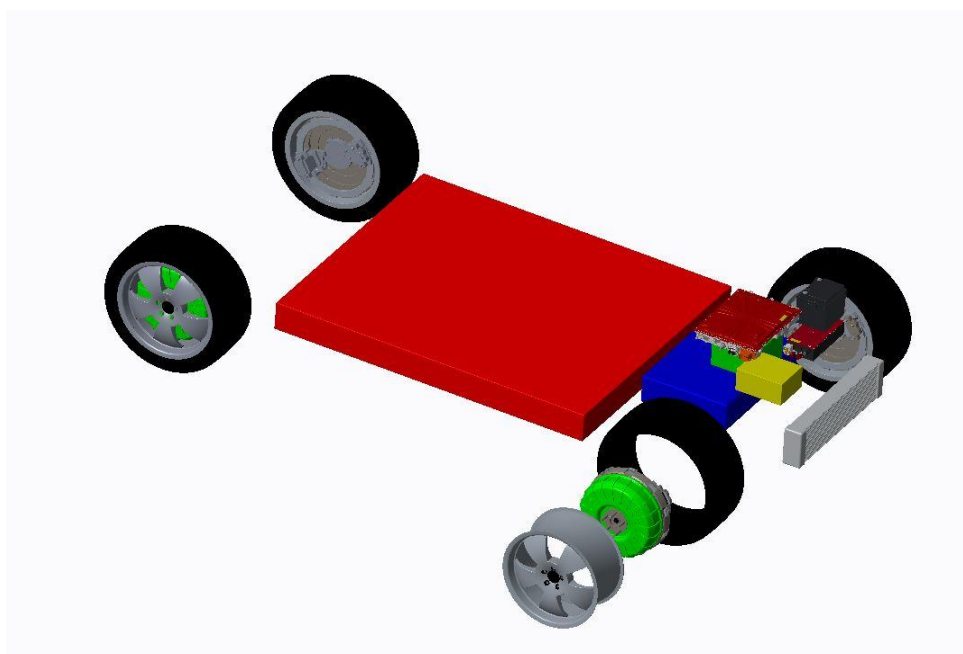
Obrázok 6-1 Rozmiestnenie komponentov (Návrh č.1)

**Charakteristiky návrhu č. 1.:**

- väčší predný odkladací priestor,
- hmotnosť pripadajúca na zadnú nápravu je väčšia,
- možnosť rozvíjať batérie pridaním ďalšieho modulu do prednej časti vozidla,
- hmotnosť sa koncentruje na zadnú časť vozidla,
- kvapalinou chladený vysokovýkonný DC/DC - menič a superkondenzátory sú ďaleko od chladiacej sústavy,
- efektívne využitie priestoru pod zadnými sedadlami.

Návrh č.2.

V prípade návrhu č.2. sa batérie nachádzajú na pôvodnom mieste ako v prípade návrhu č.1. Zmeny nastali v polohe jednotky superkondenzátorov a k nim pripojeného DC-DC meniča, ktoré sa tentokrát nachádzajú v prednej časti vozidla. Ostatné diely sú taktiež v prednej časti vozidla ale tentokrát bližšie k chladiču.



Obrázok 6-2 Rozmiestnenie komponentov (Návrh č.2)

Charakteristiky návrhu č. 2.:

- hmotnosť pripadajúca na prednú nápravu vozidla je vyššia,
- možnosť uloženia ďalšieho modulu batérie do zadnej časti vozidla,
- kvapalinou chladené komponenty sú blízko k chladiacej sústave,
- menší predný odkladací priestor,
- efektívne využitie priestoru medzi prednými kolesami.

Na základe charakteristík jednotlivých možností usporiadania komponentov zvolíme návrh č.2.



6.2 VOĽBA ZÁKLADNÝCH ROZMEROV

K určení polohy jednotlivých komponentov potrebujeme vedieť základné rozmery : rozchod a rázvor kolies. Rozchod kolies predstavuje vzdialenosť stredu pneumatík na jednej náprave. Veľkosť rozchodu kolies značne ovplyvňuje jazdnú stabilitu vozidla. Čím je rozchod väčší, tým je vozidlo stabilnejšie, hlavne pri prejazdoch zákrutami a vyhýbacích manévroch. Nevýhody väčšieho rozchodu kolies sa prejavujú hlavne pri parkovaní vozidla.

Parameter rázvor je osová vzdialenosť medzi prednou a zadnou nápravou. Dĺžka rázvoru má predovšetkým vplyv na komfort jazdy pre cestujúcich a na priestrannosť vozidla. Nevýhoda dlhšieho rázvoru tak isto spočíva hlavne v parkovaní vozidla.

Tabuľka 6-1 Rázvor a rozchod dnešných podobných vozidiel

Model	Rázvor [mm]	Rozchod [mm]	
		Predná náprava	Zadná náprava
Kia Sorento	2780	1618	1621
Audi Q5	2807	1617	1614
Porsche Macan	2807	1655	1651
Hyundai Santa Fe	2700	1633	1644
Lexus RX	2740	1630	1630
Volkswagen Touareg	2893	1656	1676
Volkswagen Tiguan	2681	1582	1572

Pri voľbe vhodných rozmerov kolies boli zohľadnené rozmery obdobných 5 až 7-miestnych osobných automobilov, ku ktorým radíme navrhovaný elektromobil (tabuľka 6-1).

Rozmery konceptu:

Rázvor:

$$D = 2800 [mm] \quad (43)$$

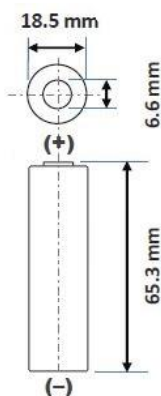
Rozchod kolies u oboch náprav:

$$L = 1630 [mm] \quad (44)$$



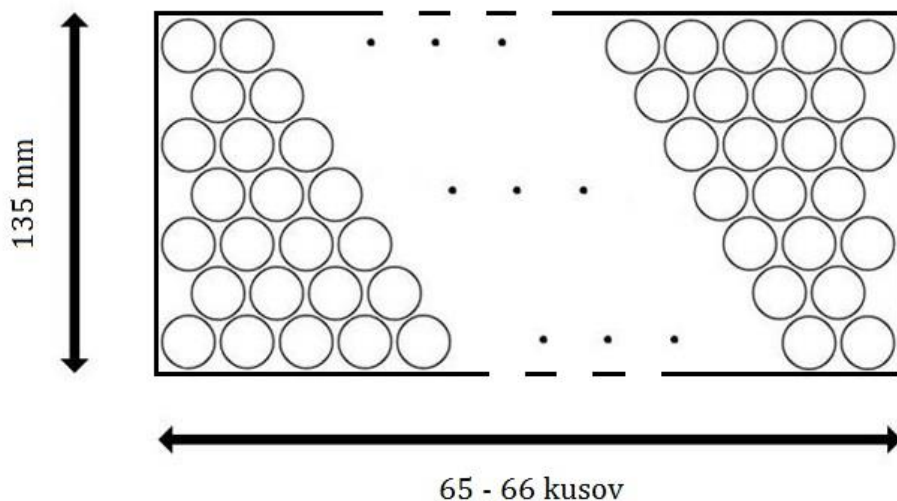
6.3 MODUL BATÉRII

Pri uložení a zoskupení batériových článkov je potrebné zohľadniť veľkosť menovitého napätia celej sústavy. Maximálne (nabitý stav) a minimálne (vybitý stav) napätie článkov musí ležať medzi hodnotami 200 V až 400 V (tabuľka 5-1). Návrh bol vytvorený prostredníctvom študentskej verzie Autodesk AutoCad 2015.

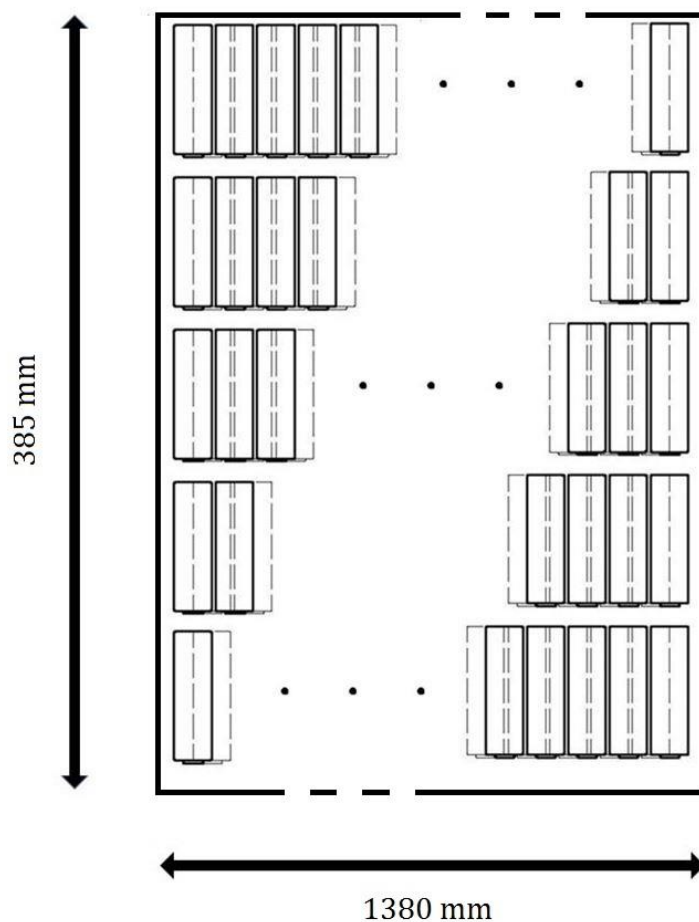


Obrázok 6-3 Rozmery batériového článku (Príloha P2)

Na základe vyššie spomínanej skutočnosti navrhujem nasledujúce riešenie. Celkový počet článkov je rozdelený do štyroch základných zásobníkov obsahujúcich 2295 článkov. Každý zásobník pozostáva z piatich modulov. Každý modul obsahuje 459 batériových článkov. Nominálne napätie jedného modulu je na úrovni 32,4 V, čo je dosiahnuté sériovým zapojením 9 batériových skupín obsahujúc 51 paralelne zapojených článkov. Z 20-tich modulov je 10 zapojených sériovo, čím nominálne napätie narastie na výslednú hodnotu 324 V. S takouto konfiguráciou narastie celkový počet celkový oproti vypočítanej hodnote 9122 kusov na 9180 kusov.



Obrázok 6-4 Schematické zobrazenie uloženia batériových článkov (pohľad z boku)



Obrázok 6-5 Znáznornenie uloženia článkov (pohľad z hora)

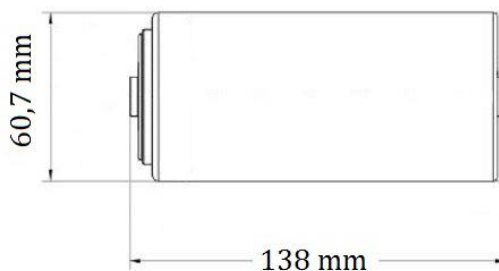
Na základe rozmerov článkov a vyššie uvedeného riešenia, uvažujeme zásobník s rozmermi 385x1380x135 mm.

Hmotnosť celej batériovej sústavy pozostáva z hmotnosti 9180 článkov spolu so samotným zásobníkom. Pretože hmotnosť zásobníku je neznáma, navýšim hmotnosť článkov o 25%.

Hmotnosť celej batériovej sústavy:

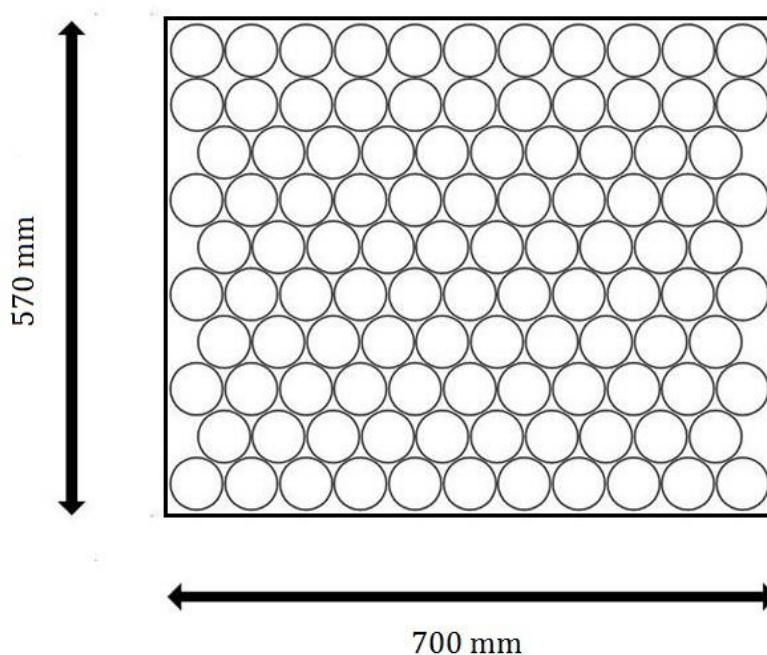
$$m_{BS} = (9180 \cdot m_B) \cdot 1,25 \approx 533,6 [kg] \quad (45)$$

6.4 MODUL SUPERKONDENZÁTOROV



Obrázok 6-6 Rozmery superkondenzátoru (Príloha P3)

V prípade superkondenzátorov sa jedná o menší počet modulov (106), avšak jednotlivé moduly majú väčšie rozmery a hmotnosť. Uloženie kondenzátorov sa uskutočňuje podobným princípom ako v prípade batériových článkov:



Obrázok 6-7 Znáznornenie uloženia superkondenzátorov (pohľad z hora)

Kondenzátory sú uložené v jednej rade na princípu obrázku. V zmysle veľkosti jedného článku uvažujeme veľkosť modulu 570x700x150 mm.

Hmotnosť zásobníka je aj v tomto prípade neznáma, kvôli čomu opäť celkovú hmotnosť 106-tich superkondenzátorov navýšim o 25%:

$$m_{ZK} = (106 \cdot m_K) \cdot 1,25 \approx 68,9 \text{ kg} \quad (46)$$



7 NÁVRH RÁMU

Rám je nosná časť vozidla, ktorá spojuje nápravy, prenáša sily medzi nápravami a karosériou, ktorá je na ráme uchytená spolu s ďalšími prvkami elektromobilu.

V súčasnosti má väčšina áut samonosnú karosériu čo znamená, že rám a karoséria vozidla tvorí jeden celok. Napriek popularite samonosnej karosérie využívajú v dnešnej dobe niektoré elektromobily rámový podvozok, ktoré sú používané najmä pri malosériovej výrobe a hybridných konštrukciách, čo poskytuje možnosť zníženia pohotovostnej hmotnosti vozidla použitím ľahších materiálov (napr.: uhlíkového kompozitu) na karosérie. Pred samotným návrhom rámu vozidla je potrebné špecifikovať základné požiadavky na rám vozidla

Požiadavky na rám vozidla

Rám musí byť:

- dostatočne pružný, aby počas svojej deformácie pri náraze absorboval čo najviac energie kontrolovaným spôsobom a aby zmiernil následky prípadnej dopravnej nehody,
- pevný a tuhý, aby dokázal odolať namáhaniam (krut a ohyb),
- ľahký, aby kompenzoval hmotnosť batérii a spotreba bola čo najnižšia,
- odolný proti korózií,
- lacný.

Návrh rámu a karosérie je v prípade elektromobilov odlišný od návrhu rámu bežných automobilov so spaľovacím motorom a ich hmotnosť je u elektromobilov podstatne dôležitejší faktor ako u automobilov so spaľovacím motorom, kde je vyššia hmotnosť jednoduchšie kompenzovateľná výkonom motora.



7.1 VOĽBA MATERIÁLU

Na základe konštatovaných požiadaviek, sú pri voľbe materiálu rámu dôležité nasledovné parametre:

- ρ - Hustota [kg/m³]
- E - Modul pružnosti v ťahu [MPa]
- $R_{p0,2}$ - Medza pevnosti v ťahu [MPa]
- R_m - Medza klzu [MPa]

Možné materiály rámu:

Konštrukčná oceľ

Najrozšírenejší materiál rámu, respektíve karosérie v dnešnej dobe je oceľ. Je lacná má veľký modul pružnosti v ťahu, jedná sa o tuhý a tvrdý materiál, avšak kvôli vysokej hustote má nevýhodnú pomer pevnosti k hustote. Z tohto dôvodu oceľ nie je najlepšou voľbou na zhotovenie rámu elektromobilov.

Parametre konštrukčných oceľov:

- $\rho = 7850$ [kg/m³]
- $E < 210$ [GPa]
- $R_{p0,2}: 300 - 1030$ [MPa]
- $R_m: 200 - 730$ [MPa]

Hliníkové zliatiny

Zliatiny hliníka majú oproti bežnej oceli oveľa väčší pomer pevnosti k hustote, vďaka čomu sú preferované najmä v leteectve a v motošporte. Výborná tvarovateľnosť, zvariteľnosť, odolnosť proti korózii a cenová dostupnosť z nich robia výbornú voľbu na zhotovenie rámu elektromobilu.

Parametre hliníkových zliatin:

- $\rho = 2760$ [kg/m³]
- $E < 72$ [GPa]
- $R_{p0,2}: 40 - 570$ [MPa]
- $R_m: 110 - 700$ [MPa]

Uhlíkové kompozity

Pri voľbe materiálu je potrebné brať v úvahu aj uhlíkové kompozity, ktoré sa v dnešnej dobe dostávajú čoraz viac do pozornosti konštruktérov aj u osobných automobilov. Vysoká pevnosť a tuhosť materiálu z nich robí výbornú voľbu pre zhotovenie, či už karosérie alebo aj rámu elektromobilu. Sú výnimočne ľahké, čím by kompenzovali vysokú hmotnosť batérií. Značnou nevýhodou materiálu je okrem vysokej ceny aj náročná tvorba foriem, čo zvyšuje náklady na výrobu.

Parametre uhlíkových kompozitov:

- $\rho = 1600$ [kg/m³]
- $E < 140$ [GPa]
- $R_{p0,2}: 590 - 1050$ [MPa]
- $R_m: 590 - 1200$ [MPa]

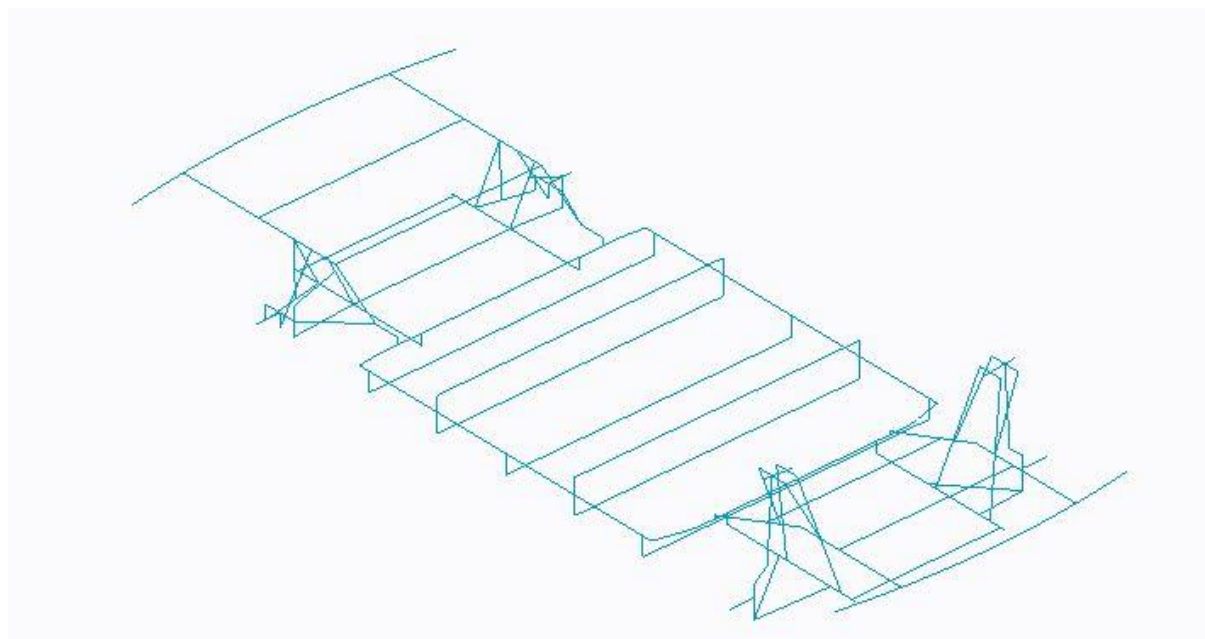
V zmysle vyššie uvedených skutočností volíme zliatinu hliníka s označením Alumec 69 (Legovacím prvkom je zinok) :

Alumec 79:

- $\rho = 2760$ [kg/m³]
- $E = 71$ [GPa]
- $R_{p0,2} = 420$ [MPa]
- $R_m = 490$ [MPa]

7.2 MODEL RÁMU

Na základe polohy jednotlivých komponentov (6.1, návrh č.2) elektromobilu a vzhľadom na splnenie požiadaviek bol vytvorený návrh rámu pomocou programu Creo parametric 3.0. Ako prvé sme vytvorili strednicový model rámu.



Obrázok 7-1 Strednicový model rámu

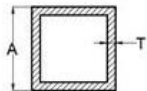
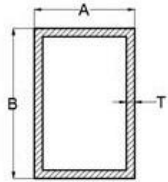
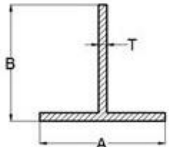
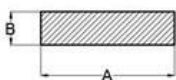
Tvorbu strednicového modelu sme začali definovaním stredu kolies na základe predom definovaného rozchodu a rázvoru kolies (kapitola 5.2). K uchyteniu rámu boli zvolené nezávislé zavesenia, pre prednú nápravu typ MacPherson, a pre zadnú nápravu typ multilink. Parametre zavesenia boli zvolené odborne, na základe existujúcich automobilov. Ďalej pomocou nástrojov „Sketch, Datum curve, Offset plane, Points“ boli vytvorené ďalšie časti a prvky rámu, ktoré



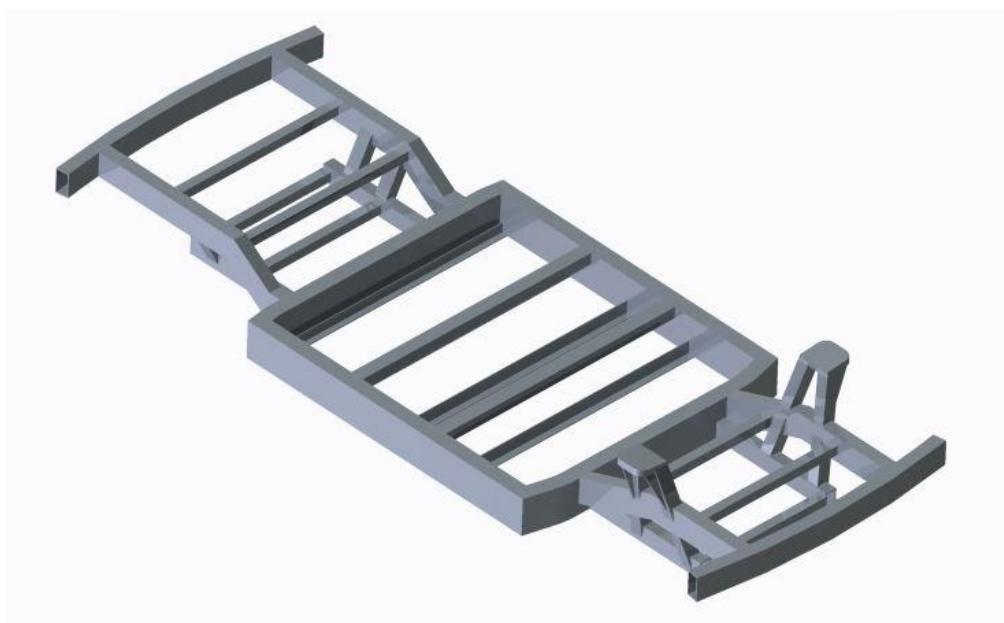
následne boli, využitím pozdĺžnej symetrie rámu, zrkadlené pomocou funkcie „Mirror“. Výsledkom je strednicový model nachádzajúci na obrázku 7-1.

Ďalším krokom bolo, na základe zvolených profilov jednotlivých prvkov (obrázok 7-2), vytvorenie 3D modelu rámu. Pri návrhu boli použité obdĺžnikové a štvorcové profily, a k uchyteniu baterií bol použitý obrátený profil „T“. Návrh bol vytvorený pomocou nástrojov „Sweep“ a „Extrude“.

Použité profily:

	Účel	Rozmery AxB, T
	Krížové výztuhy	50, 5
	Hlavné nosné prvky	80x200, 6
	Nosné prvky	70x130, 5
		60x90, 5
		60x70, 5
	Uloženie batérie	75x70, 5
	Výztuhy	60x10, 5
	Nosné prvky	175x35

Obrázok 7-2 Použité profily pri zhotovení rámu



Obrázok 7-3 Konečná podoba rámu (pohľad z hora)



Obrázok 7-4 Konečná podoba rámu (pohľad z dola)

Jedná sa o rám s prednou a zadnou deformačnou zónou a uprostred s priestorom pre trakčné batérie vozidla. Torznú tuhosť rámu zabezpečujú mohutné bočné hlavné nosné prvky, ktoré sú spojené krížovými výstuhami. Rám je približne o 40 cm užší než predpokladaná šírka vozidla, aby v prípade menej vážnej bočnej kolízie nedošlo k poškodeniu batérií, ktoré tvoria najdrahšiu časť vozidla .



7.3 PEVNOSTNÁ ANALÝZA RÁMU V PROGRAMU ANSYS

Rám, nosný prvok vozidla, je namáhaný zaťažieniami ktoré je potrebné analyzovať a následne potvrdiť, či vyvrátiť vhodnosť navrhovaného rámu. Na pevnostnú analýzu rámu využijeme študentskú verziu programu ANSYS Mechanical ADPL 15.0, ktorý pracuje na princípe MKP (Metoda Konečných Prvkov).

7.4 POSTUP PRÁCE

Ako prvé uložíme strednicový model do formátu “.iges“, ktorý je univerzálnym formátom, a program ANSYS ako aj väčšina ostatných simulačných programov sú schopné tento model spracovať.

Práca v programe Ansys pozostáva z niekoľkých dôležitých častí ako:

Import

Načítanie strednicového modelu do programu Ansys (obrázok 7-1).

Preprocessor

Jedná sa o prípravnú fázu, kde sú zadefinované z hľadiska simulácie dôležité parametre. Prvým krokom je výber vhodného elementu. Pre rám vozidla vrátane zavesenia kolies bol pre jeho jednoduchosť zvolený prvok „BEAM 189“. Pre pevnostnú analýzu sú využívané dve rôzne materiálové charakteristiky elementov. Jedna charakteristika pre hliníkový kompozit a druhá pre nereálny materiál so zvýšeným modulom pružnosti v ťahu pre nedeformovateľné prvky a zavesenie kolies. Počas pevnostnej analýzy v programe ANSYS je potrebné nedeformovateľné správanie zavesenia (dokonalá tuhosť), na prenesenie vzniknutých síl na rám vozidla.

Tabuľka 7-1 Zadané parametre

Alumec 79		Fiktívny materiál	
Modul pružnosti v ťahu	$72 \cdot 10^3 [MPa]$	Modul pružnosti v ťahu:	$1 \times 10^{14} [MPa]$
Súčiniteľ priečneho pretvorenia:	0.33	Súčiniteľ priečneho pretvorenia:	0.3

Ďalším krokom je vytvorenie profilov jednotlivých prvkov na základe obrázku 7-2. Pre zavesenie kolies sú používané kruhové profily s priemerom 20 mm. Výstupom sekcie preprocesora je vytvorený sieťový model rámu (obrázok 7-5).

Solution

V tejto časti sú zamedzené posuvy stredov jednotlivých kôl, zadefinované zaťaženie rámu a následne samotný výpočet

General Postprocessor

Časť General Postprocessor slúži na zobrazenie výsledkov.



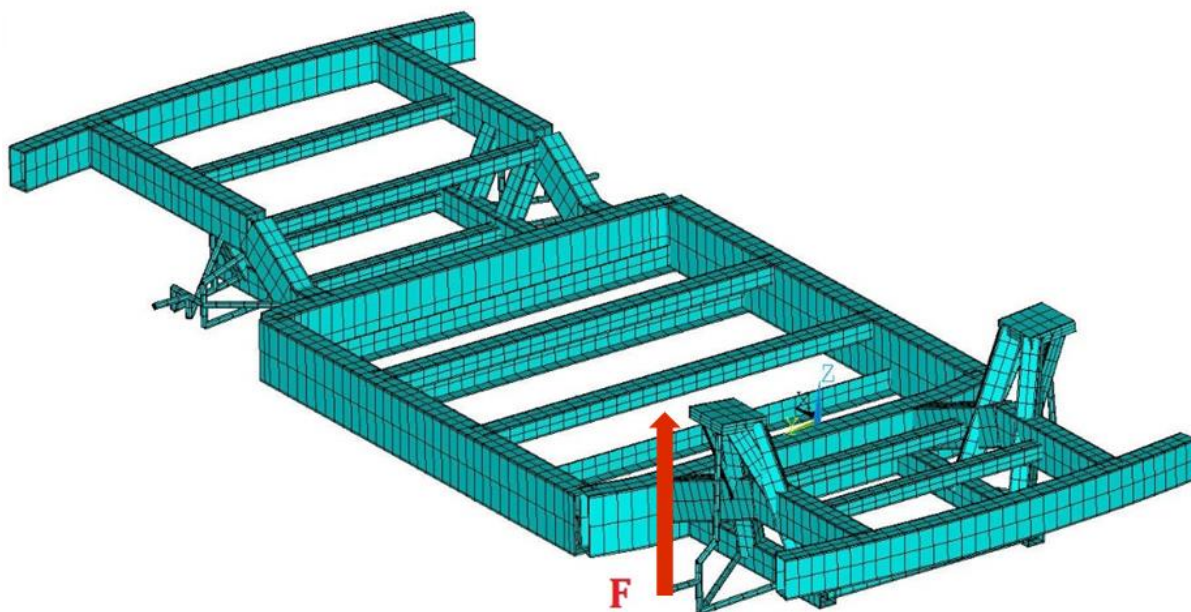
7.5 TORZNÁ TUHOŠŤ RÁMU

Jedným z významných vlastností rámu je jeho torzná tuhosť, ktorá udáva odolnosť rámu proti namáhaniu krutom. Tento moment vzniká predovšetkým počas prejazdu zákrut, teda keď je váha vozidla prenášaná z jednej strany na druhú.

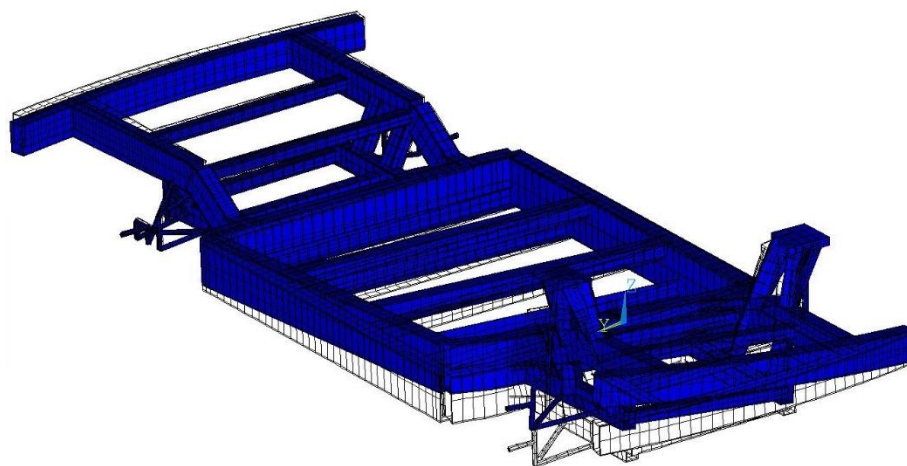
Volíme torzné namáhanie rámu silovým zaťažením v strede pravého kola v ose Z. V ostatných bodoch, ktoré predstavujú stred ostatných kolies, je posun zamedzený tak (tabuľka 7-2), aby simulácia bola správna, respektíve aby nedošlo k zosilneniu alebo naopak k zoslabeniu rámu vozidla. Veľkosť sily je zvolená na $F=1000\text{ N}$.

Tabuľka 7-2 Zamedzení posuvu v strede jednotlivých kôl

Zamedzenie posuvu v ose	X	Y	Z
Pravé zadné kolo	✓	✗	✓
Ľavé zadné kolo	✓	✓	✓
Ľavé predné kolo	✗	✓	✓

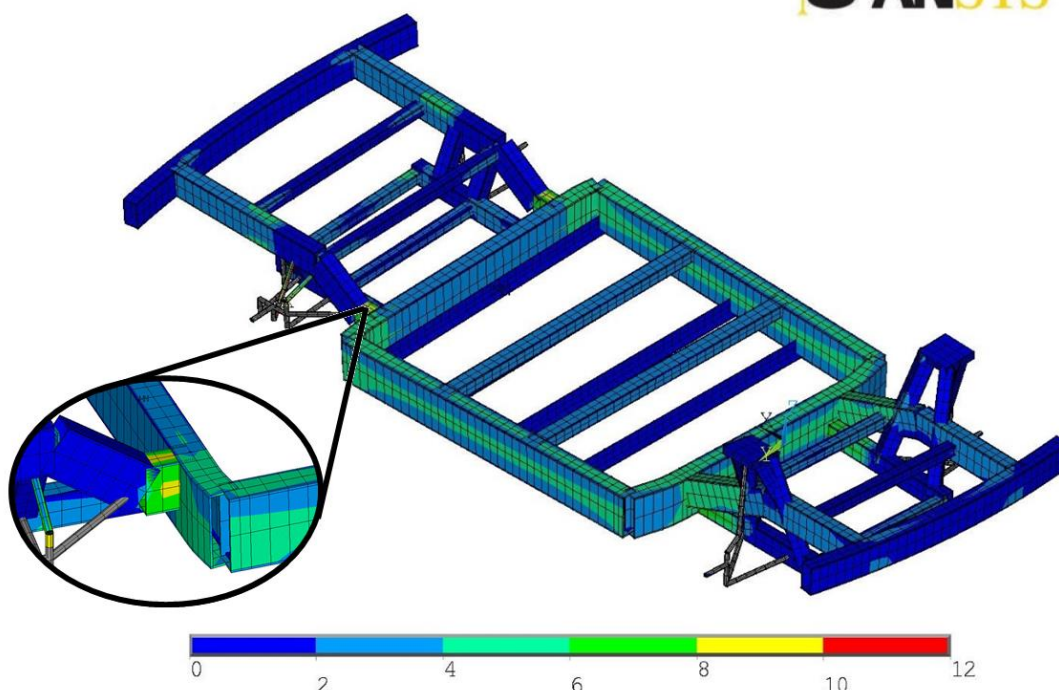


Obrázok 7-5 Sietový model rámu so zobrazením zaťažovacej sily



Obrázok 7-6 Deformovaný tvar rámu

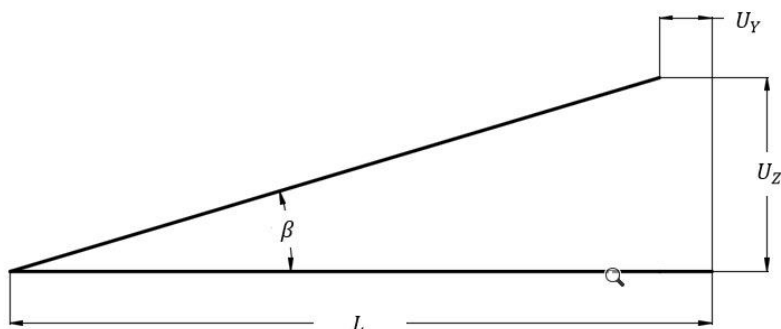
Výsledkom simulácie odhalím slabšie miesta rámu. V našom prípade, po upravení hraničných hodnôt zobrazovanej škály, zo simulácie vyplýva, že najväčšie redukované napätie vznikne v zadnej časti vozidla, ako je zobrazené na obrázku 7-7. Jedná sa o hodnotu necelých 10 MPa, ktoré na základe vlastností materiálu, nespôsobuje trvalé deformácie materiálu. V ostatných miestach hodnota napätí nepresahuje hodnotu približne 4 MPa.



Obrázok 7-7 Redukované napätie v rámu s miestom najväčším napätím (podľa kritérii Von Misses)



Po simulácii zistíme posuv v bode zaťaženia a následne vypočítame výslednú torznú tuhosť rámu pomocou schémy, ktorú zobrazuje obrázok 7-8.



Obrázok 7-8 Schéma výpočtu torznej tuhosti rámu vozidla

Výpočet výslednej torznej tuhosti rámu

Rázvor a rozchod kolies:

$$L = 1630 \text{ [mm]}$$

$$D = 2800 \text{ [mm]}$$

Posuv stredu pravého kolesa prednej nápravy v smere osy „Z“ a „Y“:

$$U_Z = 6,7009 \text{ [mm]} \quad (47)$$

$$U_Y = 0,002739 \text{ [mm]} \quad (48)$$

Uhol natočenia rámu

$$\beta = \cot \frac{U_Z}{L - U_Y} = 0,23554 \text{ [}^\circ\text{]} \quad (49)$$

Vzniknutý krútiaci moment:

$$M_k = F \cdot D = 1630 \text{ [Nm]} \quad (50)$$

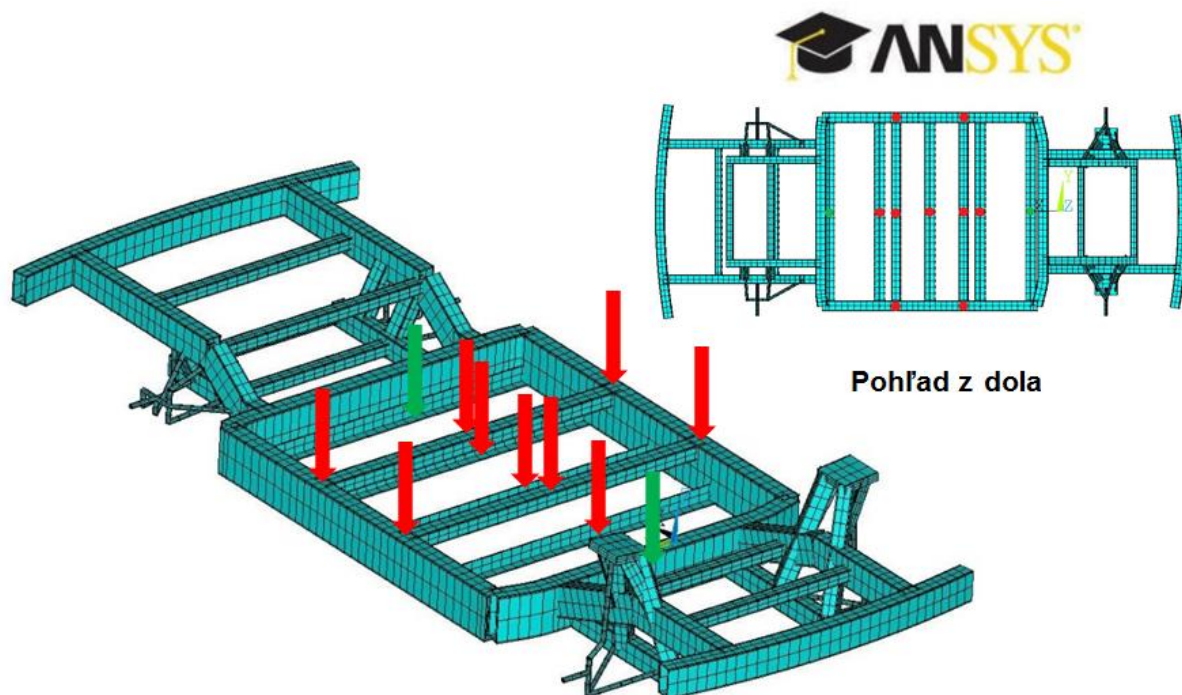
Torzná tuhosť rámu vozidla:

$$T = \frac{M_k}{\alpha} = 6920 \text{ [Nm/}^\circ\text{]} \quad (51)$$

Torzná tuhosť karosérie bežných automobilov sa pohybuje v rozmedzí 3 000 Nm/° až 30 000 Nm/°. Hodnota torznej tuhosti rámu elektromobilu je síce bližšie k dolnej hranici avšak môžeme predpokladať, že po pripevnení karosérie sa torzná tuhosť zvýši.

7.6 ZAŤAŽENIE OHYBOM

Ďalej je okrem krutového namáhania rám vozidla vďaka vysokej hmotnosti jednotlivých dielov elektromobilu a hmotnosti prepravovaných osôb vystavený aj namáhaniu ohybom. V našom prípade sa jedná o predpokladané zaťaženia na úrovni 14000 N, čo predstavuje hmotnosť batérií, piatich pasažierov a predpokladanú hmotnosť ďalších častí vozidla ako sú sedadlá alebo aj samotná karoséria vozidla.

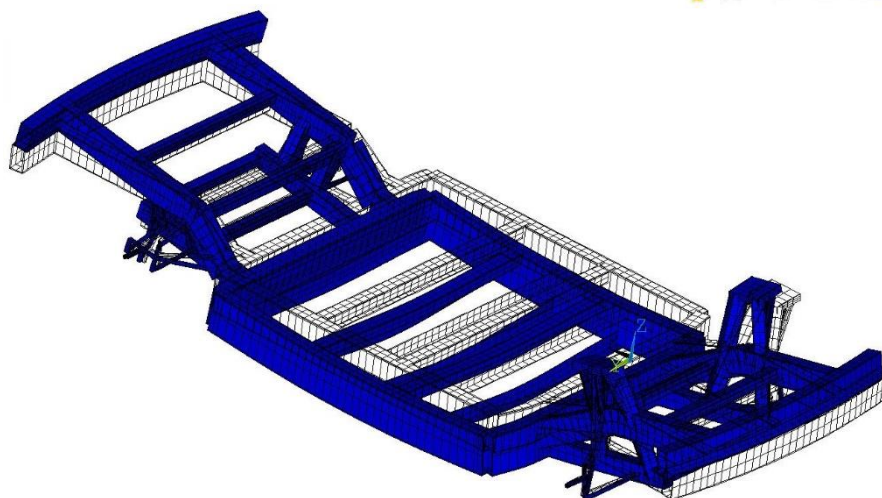


Obrázok 7-9 Zobrazenie síl a ich miesta pôsobenia

V programe Ansys zaťažujeme rám vozidla zvislými silami (v smere osy Z) v miestach uchytenia batérií, v strede bočných nosných prvkov a krížových výstuhou, ako to zobrazuje obrázok 7-9. Veľkosť jednotlivých silových pôsobení je rozlíšiteľný podľa farby; červené majú veľkosť 1400 N a zelené 700 N. Posuv jednotlivých stredov kolies je zamedzený podľa tabuľky 7-3.

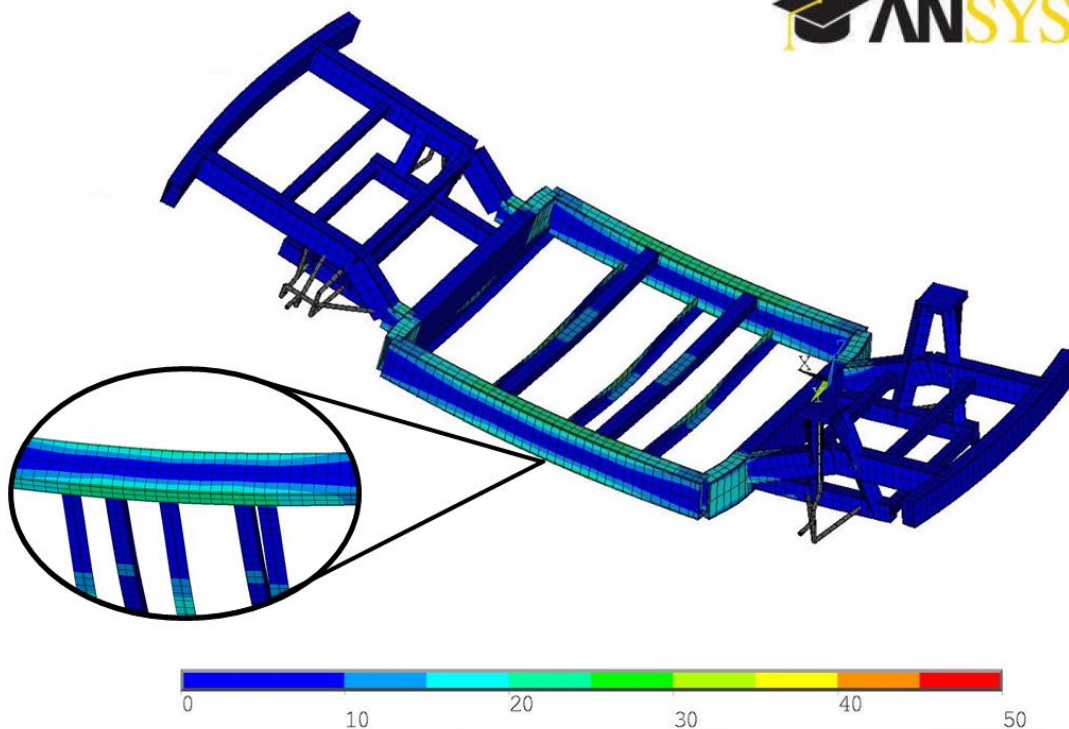
Tabuľka 7-3 Zamedzení posuvu v strede jednotlivých kôl

Zamedzenie posuvu v ose	X	Y	Z
Pravé predné kolo	✓	✓	✓
Pravé zadné kolo	✗	✓	✓
Ľavé zadné kolo	✗	✗	✓
Ľavé predné kolo	✓	✗	✓



Obrázok 7-10 Deformovaný tvar rámu

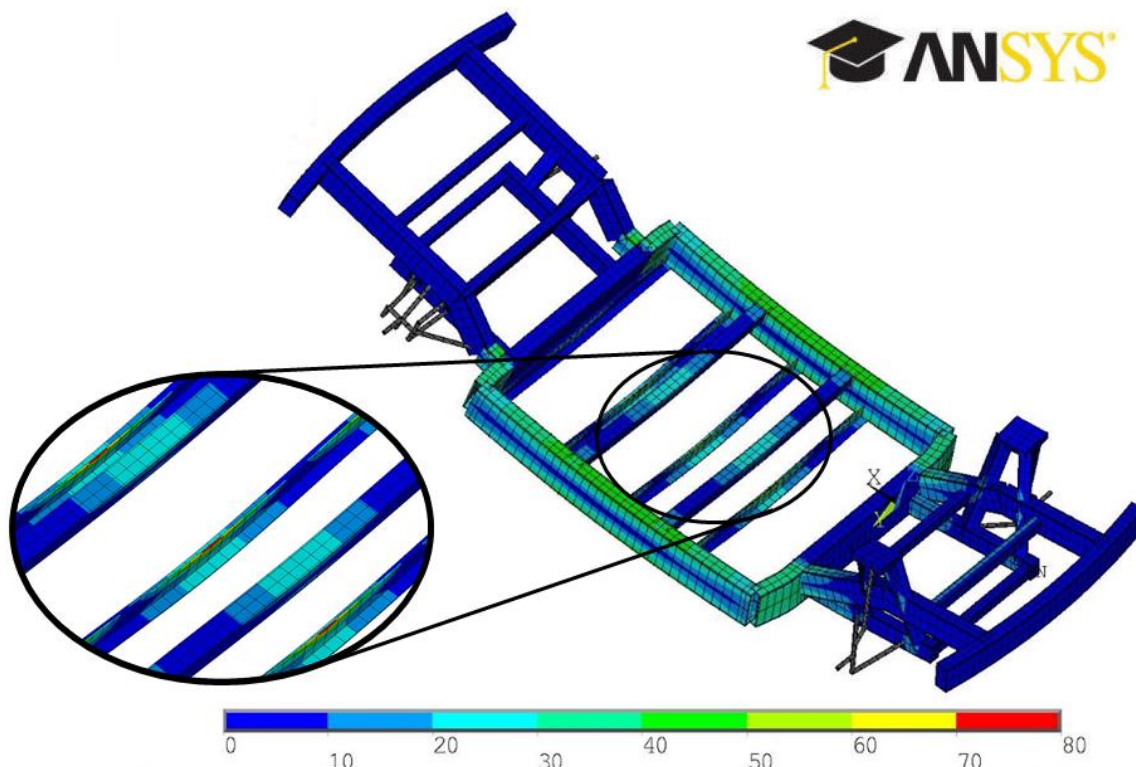
Z výsledkov vyplýva, že v dôsledku ohýbania rámu najväčšie napätie nepresahuje hraničnú hodnotu 50 MPa, ktoré vznikne v strede uchytenia batérii. O niečo menšie napätie je zaznamenané v strede bočníc na úrovni 30 MPa. Celkovo sa dá konštatovať, že rám, ako hlavný nosný prvok vozidla, stanovenými požiadavkami vyhovuje.



Obrázok 7-11 Redukované napätie v rámu pri dvojnásobnom zaťažení



Pre skompletizovanie pevnostnej analýzy rámu je potrebné zistiť správanie rámu aj počas jazdy vozidla. Z experimentálnych meraní vyplýva, že v dôsledku nerovností vozovky zvislé zrýchlenie spôsobuje až dvojnásobne vyššie zaťaženie ako zaťaženie spôsobené celkovou hmotnosťou vozidla. Jedná sa o tú istú simuláciu ako v predchádzajúcom prípade, ale tento krát s dvojnásobnou veľkosťou zaťažovacích síl.



Obrázok 7-12 Redukované napätie v rámu pri dvojnásobnom zaťažení

V dôsledku zaťaženia s celkovou silou v hodnote 28000 N, rám vozidla vykazuje najväčšie napätie opäť v strede uchytenia batériei, avšak tentokrát v hodnote nepresahujúc 80 MPa. Vzniknuté napätie je ešte stále podstatne menšie ako medza klzu materiálu, čo znamená že k trvalému deformácii rámu ani v tomto prípade nedôjde.



8 FINÁLNÝ KONCEPT ELEKTROMOBILU

8.1 HMOTNOST' NAVRHOVANÝCH ČASTÍ

Hmotnosť rámu

Hmotnosť rámu získame vynásobením objemu rámu s hustotou materiálu. Objem rámu zistíme priamo z modelu rámu vytvoreného v programe Creo Parametric 3.0.

Objem rámu:

$$V_R = 5,17 \cdot 10^{-2} [m^3] \quad (53)$$

Hmotnosť rámu:

$$m_R = V_R \cdot \rho_H = 148.54 [kg] \quad (54)$$

Hmotnosť elektromotorov (pozri: P1)

Hmotnosť štyroch elektromotorov:

$$m_E = 4 \cdot m_e = 136 [kg] \quad (55)$$

Hmotnosť nabíjačky (pozri: P2)

$$m_{NA} = 12 [kg] \quad (56)$$

Hmotnosť konvertorov

Nízkovýkonný menič (pozri: P3):

$$m_{DCL} = 4,8 [kg] \quad (57)$$

Vysokovýkonný:

$$m_{DCH} = 10 [kg] \quad (58)$$

Hmotnosť BMS systému

$$m_{BMS} = 10 [kg] \quad (59)$$

Hmotnosť autobatérie (pozri: P4)

$$m_{AB} = 6,67 [kg] \quad (60)$$

Celková hmotnosť navrhovaných komponentov:

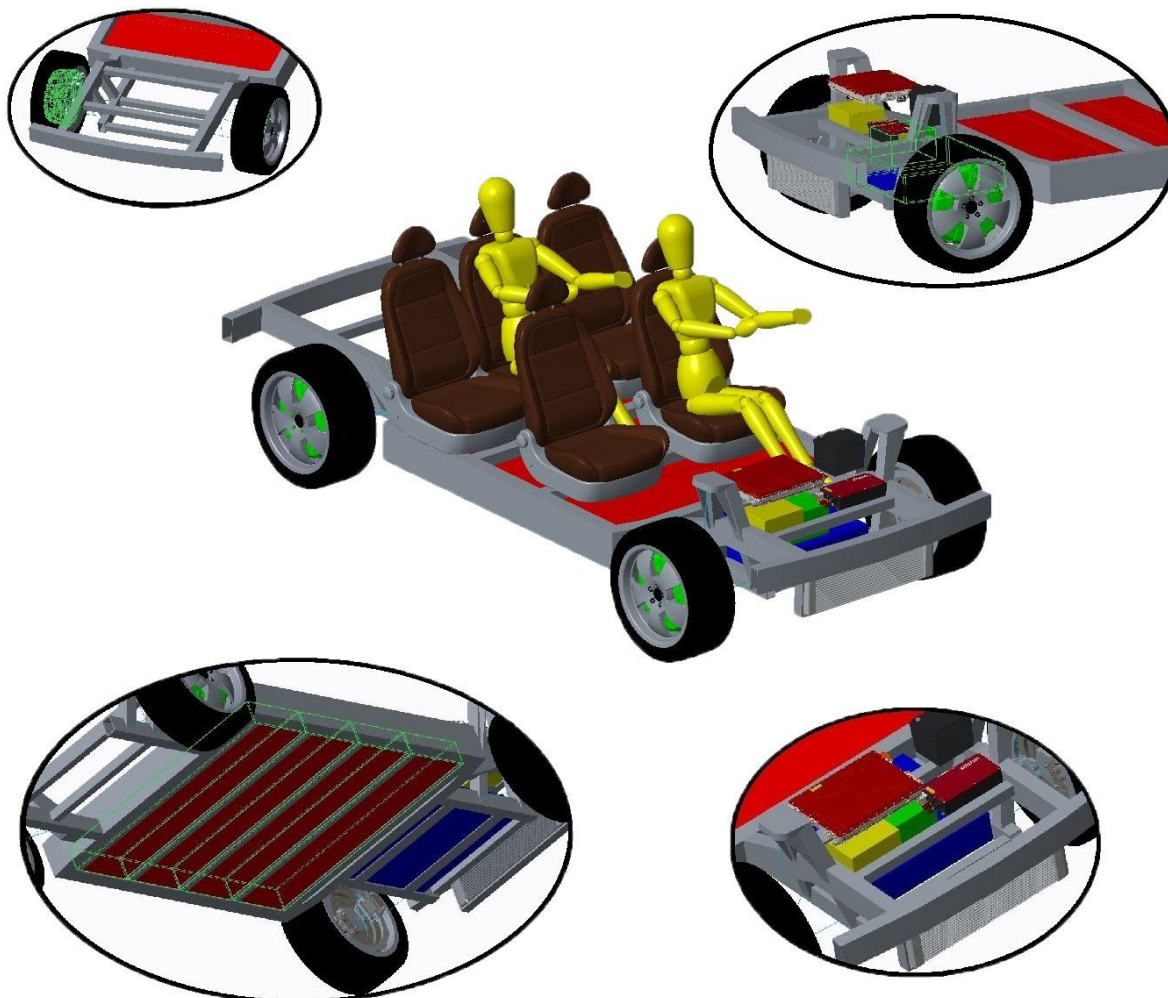
$$m_C = m_R + m_B + m_{BS} + m_{AB} + m_{ZK} + m_{NA} + m_{BMS} + m_{DCL} + m_{DCH} \quad (61)$$

$$m_C = 915,04 [kg]$$



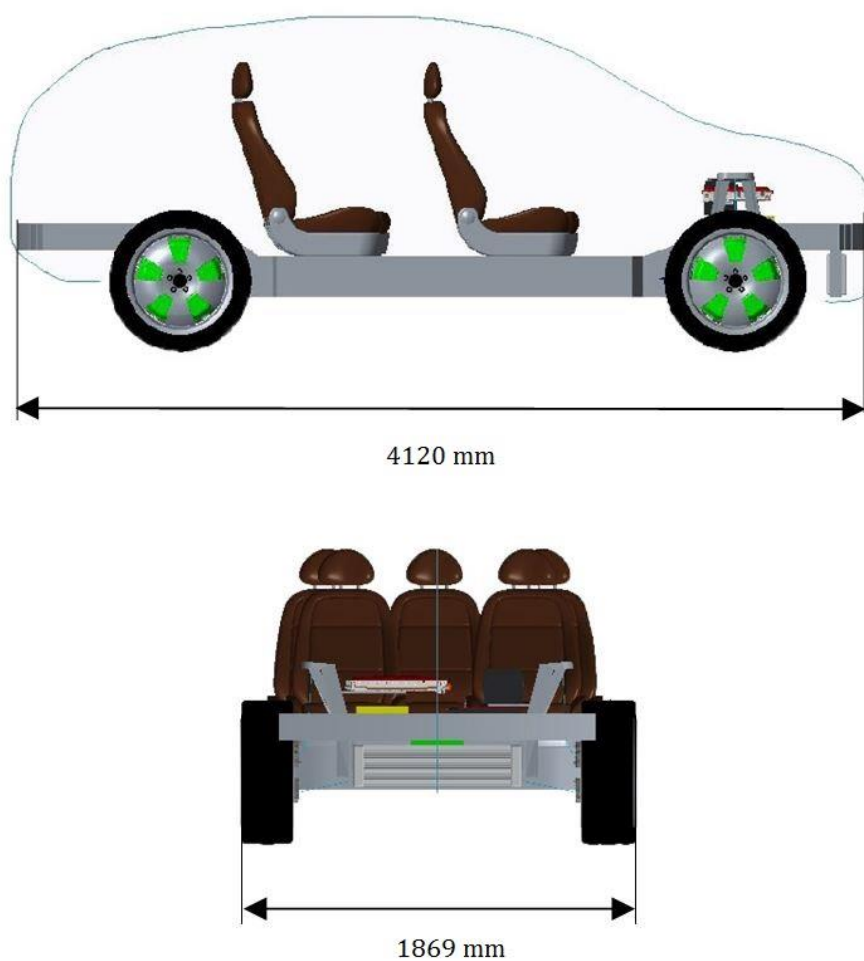
8.2 VÝSLEDNÝ NÁVRH ELEKTROMOBILU

Výsledky práce po poskladaní jednotlivých dílov a menších úpravach:



Obrázok 8-1 Výsledný návrh elektromobilu (Príloha P7)

Elektromobil slúži na prepravu primárne päť osôb avšak vzadu v obkladačiom priestore môžu byť vložené dve menšie t.j. núdzové sedadlá.

**Rozmery konceptu:**

Obrázok 8-2 Rozmery vozidla s možným bočným vzhľadom



ZÁVER

Na základe zadania diplomovej práce bol vytvorený koncepčný návrh elektromobilu s elektromotormi nachádzajúcimi sa v nábojoch kolies.

Prvým krokom v práci bolo určenie cieľov respektíve predpokladov návrhu na základe poznatkov získaných v prvej časti práce, kde bol vytvorený prehľad o súčasne dostupných technológiach týkajúcich sa hlavných komponentov elektromobilu. Následne bol s ohľadom na predom zvolené parametre vytvorený výpočtový model v programe MATLAB. Na základe jazdných odporov bola vypočítaná akcelerácia vozidla a potrebné množstvo energie na prekonanie predom zvoleného jazdného dosahu. Výstupy výpočtu boli zohľadnené pri výbere komponentov. K správne mu výberu a dimenzovaniu jednotlivých komponentov bolo potrebné zistiť fungovanie a charakteristiku jednotlivých častí elektromobilu.

Počas návrhu usporiadania komponentov bola snaha čo najefektívnejšie využiť uvoľnené miesto elektromotorom, diferenciálom a ďalších častí, ktoré sa u bežných elektromobilov nachádzajú v priestoroch karosérie vozidla.

Po voľbe vhodného riešenia usporiadania komponentov bol vytvorený rám vozidla. Prvým krokom bolo vytvoriť strednicový model, z ktorého bol následne na základe predom definovaných profilov vytvorený 3D model rámu.

Ďalším krokom bolo vykonať pevnostnú analýzu rámu v programe Ansys, kde bol rám vozidla namáhaný krútením a ohýbaním. Následne bola na základe vzniknutých výsledkov vypočítaná torzná tuhosť rámu.

Elektromobil disponuje dvoma batožinovými priestormi. Ďalej bola uvažovaná väčšia kapacita batérievej sústavy oproti dnešným elektromobilom a ako sekundárny zdroj energie boli pridané k zvýšeniu životnosti trakčných batérií superkondenzátory. Pretože sa jedná o neštandardne moderné technológie, k návrhu systému bolo potrebné dôkladne preštudovať potrebné materiály. Výstupom je dynamický, priestranný a v neposlednom rade použiteľný koncept elektromobilu, ktorý si napriek svojej vysokej predpokladanej cene môže nárokovať miesto na automobilovom trhu.

Samozrejme návrh elektromobilu týmto nie je dokončený. Je potrebné previesť ďalšie kroky ako návrh karosérie a v neposlednom rade je potrebné zistiť negatívne vplyvy neodpruženej hmoty na dynamické vlastnosti vozidla a následne patrične navrhnuť respektíve prispôbiť zavesenie a odpruženie kolies.

Hlavným cieľom návrhu bolo preukázať, napriek niektorým nevýhodám (finačné, konštrukčné atď.), výhody a využiteľnosť tohto riešenia. Celkovo možno konštatovať, že vytvorený koncept vyhovuje stanoveným požiadavkam a ciele diplomovej práce boli splnené.



POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE

- [1] LARMINIE, James a John LOWRY. Electric vehicle technology explained. Hoboken, N.J.: J. Wiley, c2003, xvii, 296 p. ISBN 04-708-5163-5.
- [2] VLK, František. Dynamika motorových vozidiel. Vyd. 2. Brno: Prof.Ing.František Vlk. DrSc., nakladatelstvo a vydavatelstvo, 2006. 432 s. ISBN 80-239-0024-2.
- [3] JAN, Z., ŽDÁNSKÝ, B. a ČUPERA, J. Automobily 1 - Podvozky. 1. vyd. Brno: AVID spol. s r.o., 2007, 228 s. ISBN 978-80-87143-03-2
- [4] P. doc. Ing. RYDLO, P Řízení elektrických střídavých pohonu, Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, p. 126.
- [5] <https://prezi.com/unq05sjkc5ys/sistemas-mecatronicos/> [online]. 2014 [cit. 2016-01-16]. Dostupné z:
- [6] <http://www.elektromobily.sk/> [online]. 2009 [cit. 2016-01-16]. Dostupné z: <http://elektromobily.sk/historia-elektromobilov-i-ciast>
- [7] <http://www.grandprixhistory.org/> [online]. [cit. 2016-01-16]. Dostupné z: http://www.grandprixhistory.org/jenatzy_bio.htm
- [8] <https://groningertram.wordpress.com/> [online]. 2011 [cit. 2016-01-16]. Dostupné z: <https://groningertram.wordpress.com/2011/01/13/de-historie-van-de-tram/>
- [9] ZVERKOVÁ, S. <http://autobild.cas.sk/> [online]. 2011 [cit. 2016-01-16]. Dostupné z: <http://autobild.cas.sk/clanok/185635/elektromobily-ovladali-planetu-dnes-hlasia-navrat>
- [10] <http://www.inuru.com/> [online]. 2011 [cit. 2016-01-16]. Dostupné z: <http://www.inuru.com/index.php/planeta/mezniky-vedy/468-historie-elektromobil-elektromotor>
- [11] <http://images.hgmsites.net/> [online]. 2011 [cit. 2016-01-16]. Dostupné z: http://images.hgmsites.net/med/1912-baker-electric-car-converted-to-solar-power-photo-by-hulton-archive-getty-images_100543559_m.jpg
- [12] TUČEK, J. <http://automobilrevue.cz/> [online]. 2009 [cit. 2016-01-24]. Dostupné z: http://automobilrevue.cz/rubriky/historie/retromobile-alternativy_38347.html
- [13] <http://www.conceptcarz.com/> [online]. [cit. 2016-01-29]. Dostupné z: http://www.conceptcarz.com/images/Milburn/22-Milburn-Electric-DV-12-RMSJ_02.jpg
- [14] <https://postmediadriving.files.wordpress.com/> [online]. [cit. 2016-01-29]. Dostupné z: <https://postmediadriving.files.wordpress.com/2015/12/nigel-1230.jpeg?quality=70&strip=all&w=800&h=520&crop=1>
- [15] <http://regmedia.co.uk/> [online]. [cit. 2016-01-29]. Dostupné z: http://regmedia.co.uk/2007/12/26/gm_electric_ev1.jpg



- [16] VEJBOR, J. <http://www.elektromobily-os.cz/> [online]. 2015 [cit. 2016-02-04]. Dostupné z: <http://www.elektromobily-os.cz/stru%C4%8Dn%C3%A1-historie-elektromobilu>
- [17] [Http://zombdrive.com/](http://zombdrive.com/) [online]. [cit. 2016-02-04]. Dostupné z: <http://zombdrive.com/images/2008-tesla-roadster-3.jpg>
- [18] HORČÍK, J. <http://www.hybrid.cz/> [online]. 2013 [cit. 2016-02-04]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/test-novy-nissan-leaf-zvlada-150-km-na-jedno-nabiti>
- [19] [Http://media.treehugger.com/](http://media.treehugger.com/) [online]. [cit. 2016-01-24]. Dostupné z: http://media.treehugger.com/assets/images/2015/10/used-nissan-leaf.jpg.662x0_q70_crop-scale.jpg
- [20] [Http://images.cdn.autocar.co.uk/](http://images.cdn.autocar.co.uk/) [online]. [cit. 2016-01-24]. Dostupné z: http://images.cdn.autocar.co.uk/sites/autocar.co.uk/files/styles/gallery_slide/public/BMWi3-Stan_30125.jpg?itok=qRtk_UkH
- [21] [Http://assets.inhabitat.com/](http://assets.inhabitat.com/) [online]. [cit. 2016-01-24]. Dostupné z: <http://assets.inhabitat.com/wp-content/blogs.dir/1/files/2014/03/Tesla-Model-S-White-0001.jpg>
- [22] [Http://srv2.betterparts.org/](http://srv2.betterparts.org/) [online]. [cit. 2016-01-24]. Dostupné z: <http://srv2.betterparts.org/images/citroen-c-zero-12.jpg>
- [23] [Http://fuelincluded.com/](http://fuelincluded.com/) [online]. [cit. 2016-2-04]. Dostupné z: http://fuelincluded.com/wp-content/uploads/2015/05/be1393e978dcb6da_Renault_Zoe_AutoBild.jpg
- [24] HORČÍK, J. <http://www.hybrid.cz/> [online]. 2013 [cit. 2016-02-04]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/novy-renault-zoe-dojezd-300-km>
- [25] [Http://t1.aimg.sk/](http://t1.aimg.sk/) [online]. [cit. 2016-02-04]. Dostupné z: <http://t1.aimg.sk/magaziny/fwXPmHwORJjZeq1wieG-SQ~Graf-kombinovan-ho-jazdn-ho-cyklu-NEDC-tyri.jpg?t=L2ZpdC1pbi82MDB4MA%3D%3D&h=Cj2HFuFGLAatSKuEL0aHMQ&e=2145916800&v=2>
- [26] [Http://www.proteanelectric.com/](http://www.proteanelectric.com/) [online]. [cit. 2016-02-04]. Dostupné z: http://www.proteanelectric.com/wp-content/uploads/2013/07/In_Wheel_Electric_Motors_AFraser_ProteanV4.pdf
- [27] [Http://carzreviewz.com/](http://carzreviewz.com/) [online]. [cit. 2016-02-04]. Dostupné z: <http://carzreviewz.com/wp-content/gallery/tesla-model-s-main/Tesla-Model-S-side-view-4.jpg>
- [28] [Http://tctech.hu/](http://tctech.hu/) [online]. [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: <http://tctech.hu/auto/tuning/ujakku.htm>
- [29] [Http://www.errolstyres.co.za/](http://www.errolstyres.co.za/) [online]. [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: <http://www.errolstyres.co.za/content/tyre-overall-rolling-diameter>



- [30] [Http://www.autoconcept-reviews.com/](http://www.autoconcept-reviews.com/) [online]. [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: http://www.autoconcept-reviews.com/cars_reviews/volkswagen/Volkswagen-e-golf-and-e-up-electric-cars-2013/cars_reviews-Volkswagen-e-golf-and-e-up-electric-cars-2013.html
- [31] [Http://b.img-zemotoring.com/](http://b.img-zemotoring.com/) [online]. [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: <http://b.img-zemotoring.com/media/reviews/2010/tesla-roadster-sport-2.5/Roadster-xray.jpg>
- [32] [Http://www.schaeffler.com/](http://www.schaeffler.com/) [online]. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/shared_media/04_sectors/01_automotive/passenger_cars/engines_1/00019046.jpg
- [33] MOZSOLICS, A. Villanymotorok a gyakorlatban .[online]. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://users.atw.hu/mozso/villanymotorok.pdf>
- [34] MAJERNÍČEK, M. <http://www.topspeed.sk/> [online]. 2014 [cit. 2016-04-27]. Dostupné z: <http://www.topspeed.sk/su-elektromobily-ekologicke-vyroba-ich-baterii-urcite-nie/6729>
- [35] [Http://carzreviewz.com/](http://carzreviewz.com/) [online]. [cit. 2016-04-27]. Dostupné z: <http://carzreviewz.com/wp-content/gallery/tesla-model-s-main/Tesla-Model-S-side-view-4.jpg>
- [36] [Http://elektromobil.vseznamu.cz/](http://elektromobil.vseznamu.cz/) [online]. [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://elektromobil.vseznamu.cz/baterie-v-elektromobilech/nimh-akumulatory>
- [37] ČERNÝ, M. <http://robodoupe.cz/> [online]. 2014 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://robodoupe.cz/2014/superkapacitory-misto-akumulatoru/>
- [38] <http://www.amazon.com/> [online]. [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://ecx.images-amazon.com/images/I/41LlTcTaRNL.jpg>



Zoznam Použitých Skratiek a Symbolov

<i>UDC</i>		Urban Driving Cycle
<i>EUDC</i>		Extra Urban Driving Cycle
<i>NEDC</i>		New European Driving Cycle
<i>BMS</i>		Battery Management System
m_v	[kg]	hmotnosť vozidla
s_v	[km]	akčný rádius vozidla
v_{max}	[m.s ⁻¹]	maximálna rýchlosť vozidla
c_x	[-]	súčiniteľ odporu vzduchu
S_x	[m ²]	čelná plocha vozidla
O_U	[mm]	účinný odvalený obvod pneumatiky
r_d	[mm]	dynamický polomer kola
π	[-]	ludolfovo číslo
s_s	[%]	stúpanie vozovky
α	[°]	uhol stúpania vozovky
f_v	[-]	súčiniteľ váľivého trenia
g	[m.s ⁻²]	gravitačné zrýchlenie
ρ_v	[kg.m ⁻³]	hustota vzduchu
m_p	[kg]	hmotnosť jedného pasažiera
F_A	[N]	aerodynamický odpor
v_v	[m.s ⁻¹]	rýchlosť vozidla
P_A	[kW]	potrebný výkon pre prekonanie aerodynamického odporu
F_S	[N]	odpor stúpania
P_S	[kW]	výkon potrebný k prekonaniu odporu stúpania
F_Z	[N]	odpor zrýchlenia
a	[m.s ⁻²]	zrýchlenie vozidla
J_m	[kg.m ²]	moment zotrvačnosti rotoru elektromotora
J_k	[kg.m ²]	moment zotrvačnosti kolies
ϑ	[-]	súčiniteľ vplyvu pohybujúcich častí
P_Z	[kW]	potrebný výkon pre prekonanie odporu zrýchlenia
F_V	[N]	odpor válenia



P_V	[kW]	potrebný výkon k prekonaniu valivého odporu
F_H	[N]	hnacia sila
P_O	[kW]	potrebný výkon k prekonanie jazdných odporov pri v_{max}
F_{Amax}	[N]	aerodynamický odpor pri v_{max}
M	[N.m]	krútiaci moment elektromotoru
P	[kW]	výkon elektromotoru
ω	[rad.s ⁻¹]	uhlová rýchlosť elektromotoru
ω_k	[rad.s ⁻¹]	kritická uhlová rýchlosť elektromotoru
n_k	[ot.min ⁻¹]	kritické otáčky elektromotoru
M_{max}	[N.m]	maximálny krútiaci moment elektromotoru
M_{trv}	[N.m]	trvalý krútiaci moment elektromotoru
P_{max}	[kW]	maximálny výkon elektromotoru
P_{trv}	[kW]	trvalý výkon elektromotoru
m_E	[kg]	hmotnosť elektromotoru
I_B	[mA.h]	kapacita batériového článku
m_B	[g]	hmotnosť batériového článku
E_{HO}	[Wh.l ⁻¹]	objemová energetická hustota batériového článku
E_{HH}	[Wh.kg ⁻¹]	hmotnostná energetická hustota batériového článku
U_B	[V]	menovité napätia batériového článku
E_C	[kW.h]	celková kapacita batérie sústavy
$E_{\check{C}}$	[Wh]	kapacita jedného batériového článku
P_{OB}	[-]	minimálny počet batériových článkov
U_K	[V]	menovité napätia superkondenzátoru
C_K	[F]	kapacita superkondenzátoru
E_K	[Wh]	energia superkondenzátoru
I_{Kmax}	[A]	maximálny prípustný prúd superkondenzátoru
m_K	[kg]	hmotnosť superkondenzátoru
η_K	[-]	účinnosť superkondenzátoru
E_R	[Wh]	regenerovaná energia
U_{KZ}	[V]	celkové napätie plne nabitých superkondenzátorov
$U_{KZ50\%}$	[V]	minimálne celkové napätie superkondenzátorov
P_{OK}	[-]	počet superkondenzátorov
E_Z	[Wh]	celková energia superkondenzátorov



D	[mm]	rázvor kolies
L	[mm]	rozchod kolies
m_{BS}	[kg]	celková hmotnosť bateriovej sústavy
m_{ZK}	[kg]	celková hmotnosť superkondenzátorov (vrátane zasobníka)
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota materiálu
E	[GPa]	modul pružnosti v ťahu
$R_{p\ 0,2}$	[MPa]	medza pevnosti v ťahu
R_m	[MPa]	medza klzu
F	[N]	zaťažovacia sila
U_Z	[mm]	posuv stredu kolesa v smere osy „Z“
U_Y	[mm]	posuv stredu kolesa v smere osy „Y“
β	[°]	uhol natočenia rámu
M_k	[Nm]	krútiaci moment pôsobiaci na rámu vozidla
T	[Nm/°]	torzná tuhosť rámu
V_R	[m ³]	objem rámu vozidla
m_R	[kg]	hmotnosť rámu vozidla
m_{NA}	[kg]	hmotnosť nabíjačky
m_{DCL}	[kg]	hmotnosť nízkovýkonného meniča
m_{DCH}	[kg]	hmotnosť vysokovýkonného meniča
m_{BMS}	[kg]	hmotnosť BMS systému
m_{AB}	[kg]	hmotnosť autobatérie
m_c	[kg]	celková hmotnosť navrhovaných komponentov



ZOZNAM PRÍLOH

Príloha P1 Technický list elektromotoru Protean PD18

Príloha P2 Technický list baterií Panasonic 18650B

Príloha P3 Technický list superkondenzátoru Maxwell K2

Príloha P4 Technický list konvertoru Brusa BSC6

Príloha P5 Technický list nabíjačky Brusa NLG664

Príloha P6 Technický list autobatérie SmartBattery SB40

Príloha P7 CD: 3D model koncepčného elektromobilu, Matlab skript a výsledok analýzy v programe Ansys.